

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Jiří Hejděnek**

Studijní program:

B2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor:

2109R035 Technologie výroby kovů

Téma:

Metody studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli

Methods of the Metallurgical Processes Study Occurring during Casting and Solidification of Steel

Zásady pro vypracování:

1. Charakteristika procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli
2. Podrobná analýza současné literatury z oblasti provozních a laboratorních metod studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli
3. Shrnutí literárních poznatků a doporučení experimentálních metod vhodných pro současné potřeby českého ocelářství
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Články z odborných časopisů fondu Ústřední knihovny VŠB-TU Ostrava, jako např. *Hutnické listy*, *Iron & Steel Technology*, *ISIJ International*, *Metallurgical and Materials Transaction*, *Revue de Métallurgie*, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, *Stahl und Eisen*, *Steel Research International* aj.
- [2] Články z vědeckých publikací získaných pomocí e-zdrojů a odborných databází, jako např. *Springer Link*, *ISI WOK*, *Scopus*, *Metal* aj.
- [3] Sborníky z konferencí, jako např. *SteelSim*, *ISSTech*, *METAL* aj.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Gryc, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 30.04.2012



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.  
děkan fakulty

# Zásady pro vypracování bakalářské práce

## I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 5. Obsah BP                  |
| 2. Zásady pro vypracování BP                 | 6. Textová část BP           |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy                   |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na

ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra . . . . .*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

### IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2011/2012.

Ostrava 30. 11. 2011

**Prof. Ing. Ludvík Dobrovský, CSc., Dr.h.c.**  
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ..... 28.8.2012

.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)



## **PODĚKOVÁNÍ**

*Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Karlovi Grycovi, Ph.D. a konzultantce Ing. Markétě Tkadlečkové, Ph.D. za cenné rady, odbornou pomoc, vstřícnost a trpělivost při jejím zpracování.*

*Jiří Hejděnek*

---

## ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na rozbor soudobých provozních a laboratorních metod studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli na zařízení plynulého odlévání oceli. Pozornost je zaměřena na jednotlivé technologické uzly mezi lící pánví, ochrannou trubici, zátkovou tyčí mezipánve, mezipánve, ponornou výlevkou a krystalizátorem.

Druhá část je věnována vlastní analýze současné literatury z oblasti provozních a laboratorních metod studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli.

V třetí závěrečné části se uvádí shrnutí literárních poznatků a doporučení experimentálních metod vhodných pro současné potřeby českého ocelářství.

**Klíčová slova:** ocel, odlévání, lící pánev, mezipánev, krystalizátor, modelování

## ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on analysing of the current operational and laboratory methods for studying of metallurgical processes occurring during casting and solidification of steel during its continuous casting. Attention is focused on individual technological nodes between ladles, protective tube, stopper rod tundish, tundish, submerged nozzle and mould.

The second part is devoted to own analysis of the current literature in the field of laboratory methods and plant trials used for metallurgical processes occurring during continuous casting and solidification of steel.

In the third part, the final summarizing the literature findings and recommendations of experimental methods suitable for the present needs of the Czech steel industry is presented.

**Key words:** steel, casting, ladle, tundish, mould, modelling

---

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Charakteristika procesů probíhajících při lití a tunutí oceli .....</b>	<b>2</b>
1.1 Lící pánev .....	4
1.2 Ochranná trubice .....	6
1.3 Mezipánev.....	7
1.4 Zátková tyč mezipánve.....	7
1.5 Ponorné trubice a výlevky .....	8
1.6 Krystalizátor.....	9
1.7 Sekundární chlazení .....	11
<b>2 Analýza současné literatura z oblasti provozních a laboratorních metod studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tunutí oceli.....</b>	<b>14</b>
2.1 Příklad způsobu studia metalurgických procesů probíhajících v lící pánvi .....	14
2.2 Metody studia metalurgických procesů probíhajících v oblastech mezipánvi .....	14
2.2.1 Matematický model hmotnostních toků oceli na ZPO 2 v Třineckých železárnách, a.s. ....	15
2.2.2 Vliv krycích strusek v mezipánvi ZPO na čistotu bram .....	15
2.2.3 Experimentální porovnání vlivu konstrukce mezipánve na proudění oceli .....	17
2.2.4 Návrh úprav v oblasti mezipánve bramového ZPO na základě numerického a fyzikálního modelování .....	19
2.2.5 Fyzikální modelování různých modifikací dopadového místa mezipánve .....	20
2.2.6 Možnosti úpravy proudění oceli v symetrické mezipánvi .....	20
2.3 Metody studia metalurgických procesů v oblasti krystalizátorů .....	21
2.3.1 Experimentální měření pracovních podmínek v krystalizátoru sochorového ZPO ..	21
2.3.2 Stanovení vlivu elektromagnetického míchání na velikost promíchávaného objemu v krystalizátoru .....	23
2.3.3 Vybrané zkušenosti z monitoringu oscilace krystalizátoru bramového ZPO .....	24
2.3.4 Vliv elektrického napětí na chování lícího prášku během tunutí předlitků.....	24
2.3.5 Vliv hloubky ponoření stínicí trubice na kvalitu tekuté oceli vystupující z krystalizátoru tvaru delta čtyřproudového ZPO .....	26
2.3.6 Predikce kritických provozních podmínek při plynulém lití .....	27
<b>3 ZÁVĚR .....</b>	<b>29</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>31</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>31</b>

## ÚVOD

Cílem bakalářské práce je rozbor soudobých především provozních a laboratorních metod studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli.

První část je zaměřena na stručnou charakteristiku metalurgických procesů lití a tuhnutí oceli probíhajících na zařízení plynulého odlévání oceli. Jsou popsány jednotlivé technologické uzly a v nich probíhající kritické procesy. Pozornost je zaměřena na licí pánev, ochrannou trubici, zátkovou tyč mezipánve, mezipánev, ponornou výlevku a krystalizátor.

Druhá část bakalářské práce je věnována vlastní analýze současné literatury z oblasti provozních a laboratorních metod studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli převážně v podmínkách plynulého odlévání. V oblasti licích pánví je pozornost zaměřena na popis matematické modelování hmotnostních toků oceli na ZPO 2 v Třineckých železárnách, a.s. a na možnosti fyzikálního modelování přenosových pochodů při použití různých variant dmýchání inertního plynu.

V rámci mezipánví se práce věnuje popisu vlivu krycích strusek na čistotu bram, experimentálního pozorování vlivu konstrukce mezipánve na proudění oceli, návrhu úprav v oblasti mezipánve bramového ZPO na základě numerického a fyzikálního modelování, fyzikální modelování různých modifikací dopadového místa mezipánve a možnosti úprav proudění oceli v symetrické mezipánvi.

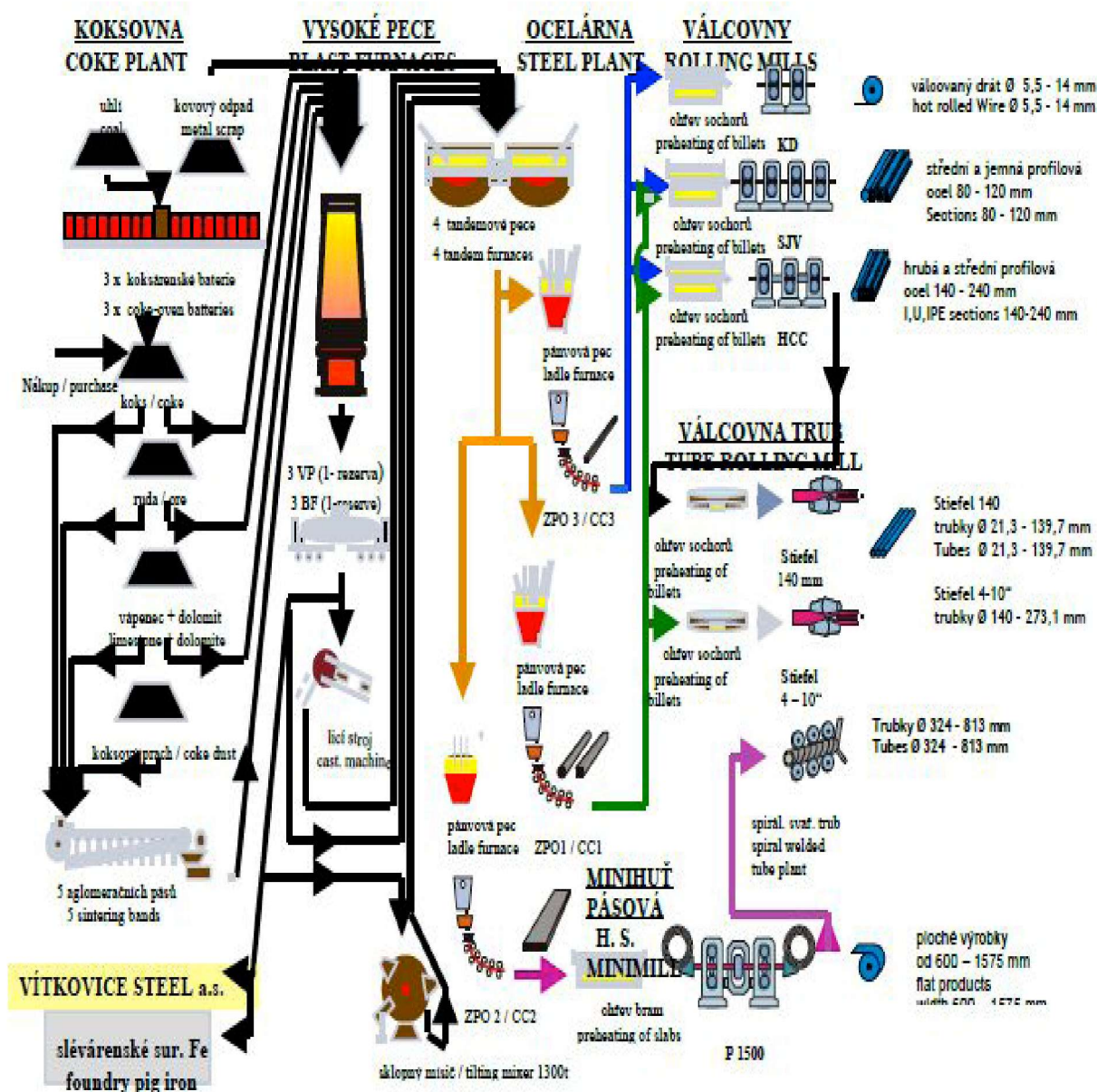
V případě krystalizátoru práce analyzuje literaturu z oblasti experimentálního měření pracovních podmínek v krystalizátoru sochorového ZPO, stanovení vlivu elektromagnetického míchání na velikost promíchávaného objemu v krystalizátoru a vybrané zkušenosti z monitoringu oscilace krystalizátoru bramového ZPO.

Třetí závěrečná část uvádí shrnutí literárních poznatků a doporučení experimentálních metod vhodných pro současné potřeby českého ocelářství.



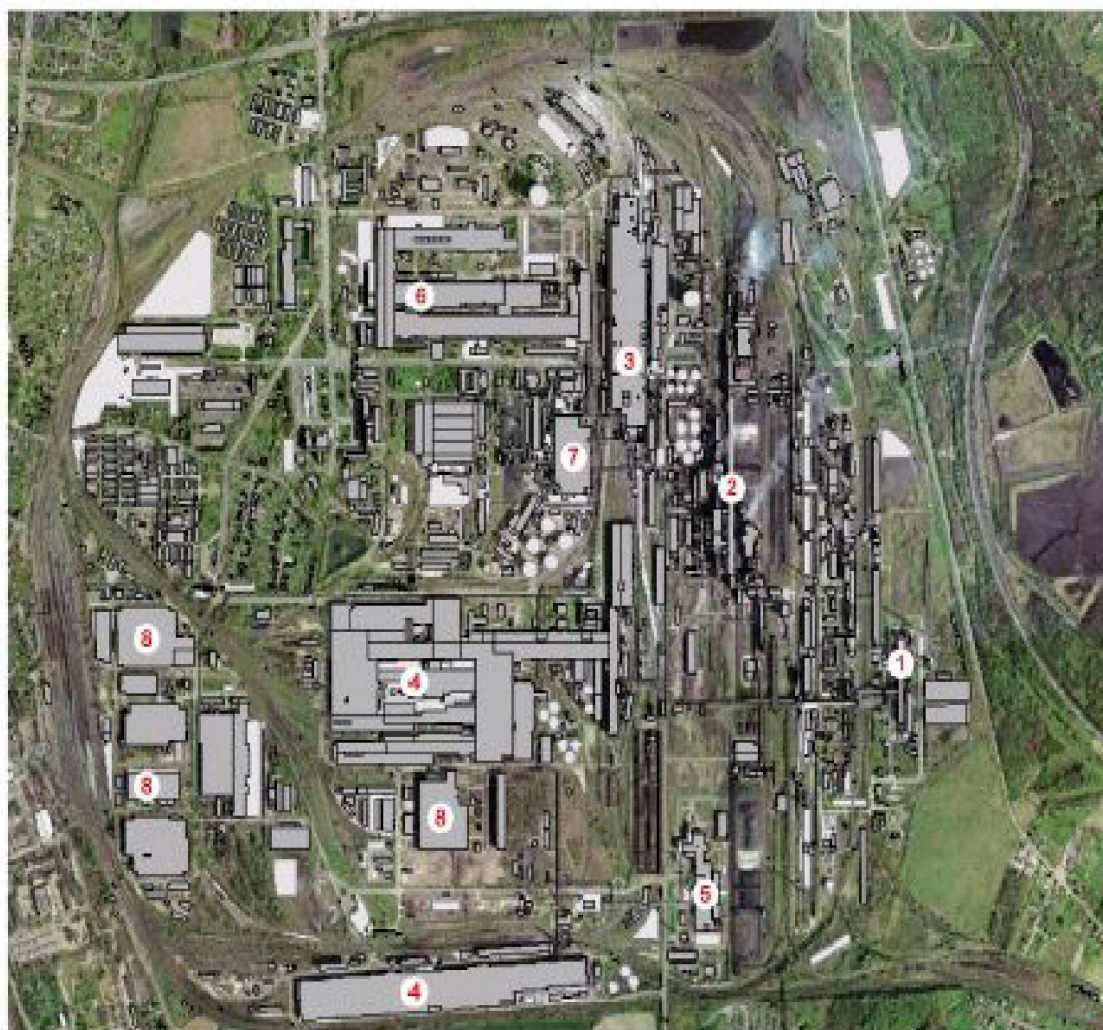
# 1 Charakteristika procesů probíhajících při lití a tunutí oceli

Výroba oceli probíhala v siemens-martinských pecích, tandemových pecích, nyní probíhá převážně v konvertorech a v elektrických (především obloukových) pecích. Odlévání oceli je realizováno především pomocí zařízení na plynulé odlévání oceli (částečně také ingotovou cestou do kokil). Menší část oceli se využívá ve slévárnách na ocelové odlitky. Přehled jednotlivých hutních pochodů a agregátů k výrobě oceli až po finální hutnické výrobky, znázorňuje schéma (obr.1).



Obr. 1: Koncepce hutního podniku [2]

Příklad skutečné dispozice hutního podniku znázorňuje **obr.2**.



LEGENDA:

- 1 Koksovna
- 2 VYSOKÉ PECE Ostrava, a.s.
- 3 Ocelárna
- 4 Válcovny
- 5 Minihut pásová
- 6 Rourovny
- 7 Energetika
- 8 Externí společnosti

LEGEND:

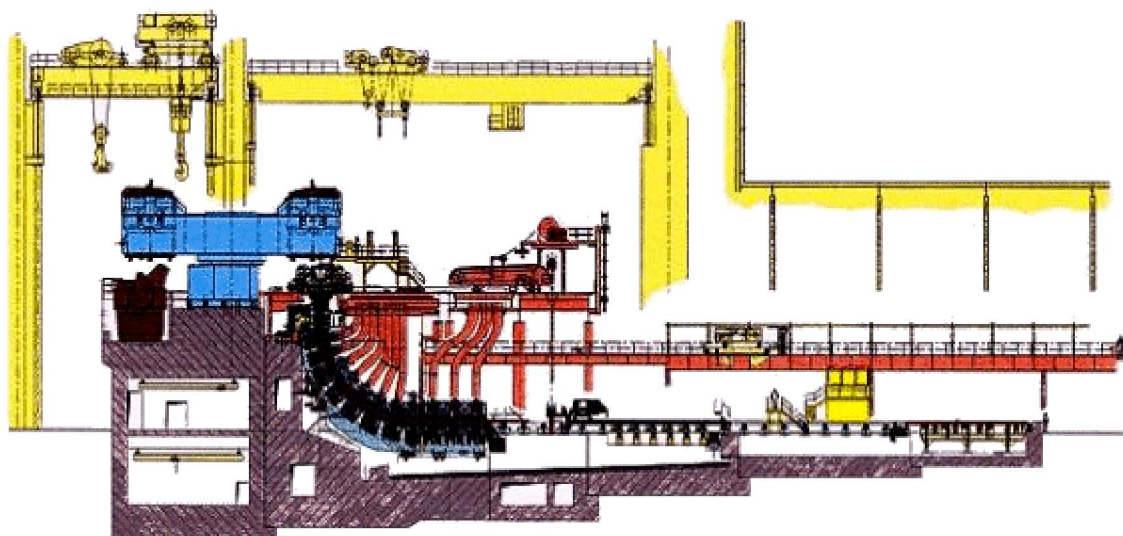
- 1 Coke Plant
- 2 VYSOKÉ PECE Ostrava, a.s.  
(Blast Furnaces)
- 3 Steel Plant
- 4 Rolling Mill
- 5 Hot Strip Minimill
- 6 Tube Rolling Mill
- 7 Power Plant
- 8 External Companies

**Obr. 2:** Skutečná dispozice hutního podniku [2]



Jak již bylo naznačeno výše, převažuje v současnosti výroba oceli kontinuální cestou na zařízení pro plynulé odlévání oceli (dále jen ZPO). Lití na ZPO je ekonomicky výhodnější a energeticky úspornější technologický proces. Výroba ingotů je náročná na spotřebu kokil, licích podložek, energetický ohřev v hlubinných pecích, zvýšenou manipulací apod. [1,2].

Mimopecní zpracování oceli se provádí na pracovišti pánvové metalurgie před dodáním oceli na ZPO (**obr.3**). Pomocí jeřábu se licí pánev dopraví na otočný stojan ZPO. Ocel se odlévá z licí pánve přes stínicí trubici do mezipánve a z mezipánve přes ponornou výlevku do vodou chlazené formy – krystalizátoru. V kontinuální sekundární zóně tvořené zařízením tažných válců, dochází k tuhnutí kontislitku. Kontislitek prochází zakřiveným radiálním tvarem ZPO, který se po vyrovnaní dopraví k dělicímu zařízení pálicích strojů. Následně se jeřábem ukládají primární kontislitky (např. bramy) na vychlazovací pole. Po vychlazení se bramy převážejí pomocí bramového manipulátoru na expediční linky a dopravují k pálicím strojům pro sekundární dělení na požadované délky bram dle zakázkových předpisů k následnému válcování [1].



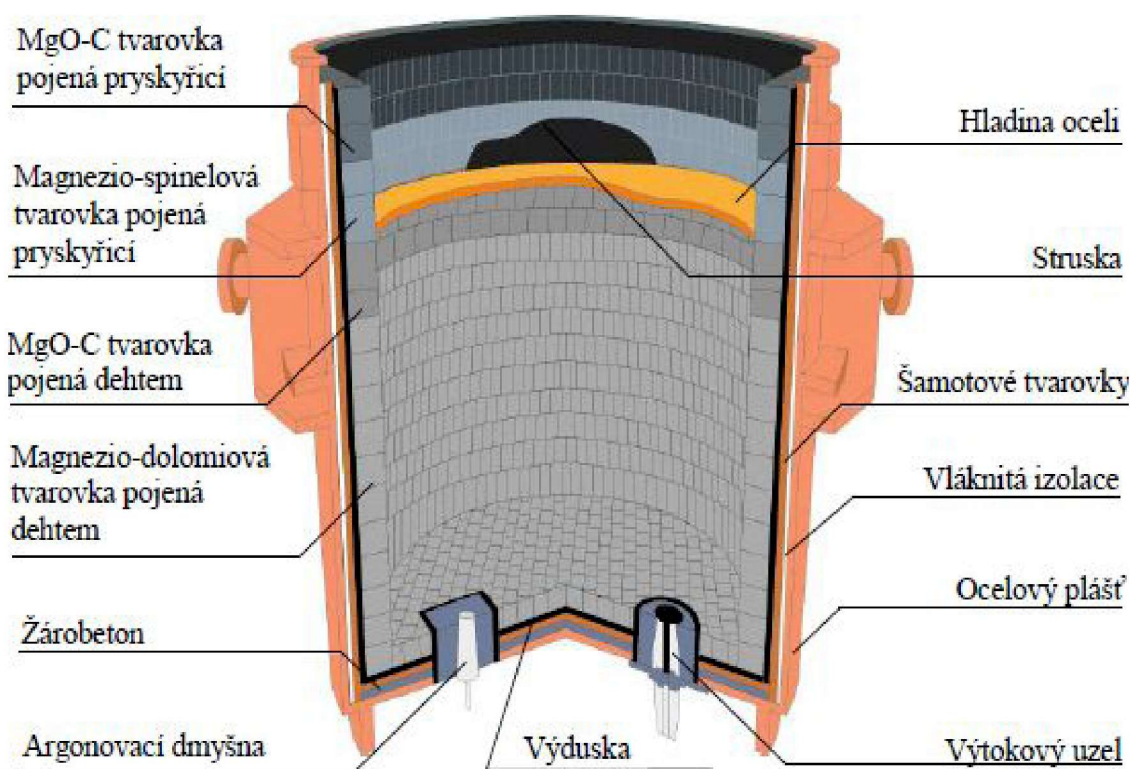
**Obr. 3:** Zařízení pro plynulé odlévání bram [3]

### 1.1 Licí pánev

Licí pánev je hlavní součástí pánvové metalurgie. Kromě provádění rafinačních metalurgických zásahů slouží také k přepravě tekuté oceli z konvertoru do mezipánve. Má konický tvar komolého kužele rozšiřujícího se směrem nahoru. Velikost odlévacích pánví se

pohybují dle hmotností taveb od 5 tun do 500 tun oceli (**obr.4**).

Vyzdění lící pánve z vysoce jakostních žáruvzdorných materiálů zaručuje její vysokou životnost. Při několika násobném používání, dochází k opotřebení vyzdívky korozivním a erozivním působením tekutého kovu a strusky. Používáním izolačních vrstev mezi ocelovým pláštěm a vyzdívkou. Konstantním vysokoteplotním režimem lící pánve je zajišťováno zpomalení procesu opotřebení vyzdívky. Při styku lící pánve s ocelí musí žáruvzdorný materiál zabezpečit rovnoměrné dávkování tekutého kovu, zamezit oxidaci vytékajícího proudu oceli do mezipánve a krystalizátoru [1,4].



**Obr.4:** Schéma lící pánve [5]

Rychlost výtoku oceli je dána výškou kovu v lící pánvi, vnitřním třením mezi povrchem výlevky a tekutou ocelí, teplotou, viskozitou, tvarem výlevky, odporem vzduchu, turbulentním napětím a také řízením polohy otevíracího zařízení (šoupátko, tyč). Proud oceli ve výlevce je značně deformován tvořícími se pulzujícími částmi, které mohou přejít až k odtržení podílu lícího proudu. K zabránění necelistvosti lícího proudu a turbulencí, slouží konstrukční uspořádání výlevky [1,4].

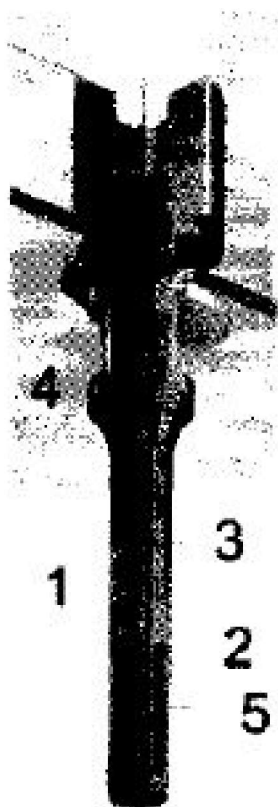
HEJDĚNEC, J. *Metody studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli*. VŠB-TU Ostrava, FMFI, 2012.



## 1.2 Ochranná trubice

Hlavním úkolem ochranné (stínicí) trubice (**obr.5**), je ochrana lícího proudu před oxidací vzdušným kyslíkem. Zajišťuje co nejmenší tepelné ztráty tekoucí oceli a snižuje turbulence povrchu hladiny v mezipánvi. Výběr ochranné trubice závisí na typu odlévané oceli, její dobou odlévání a složením strusky v mezipánvi. Většinou se skládá ze čtyř druhů materiálů v různých částech ochranné trubice s ohledem na maximální výdrž a minimální náklady [1].

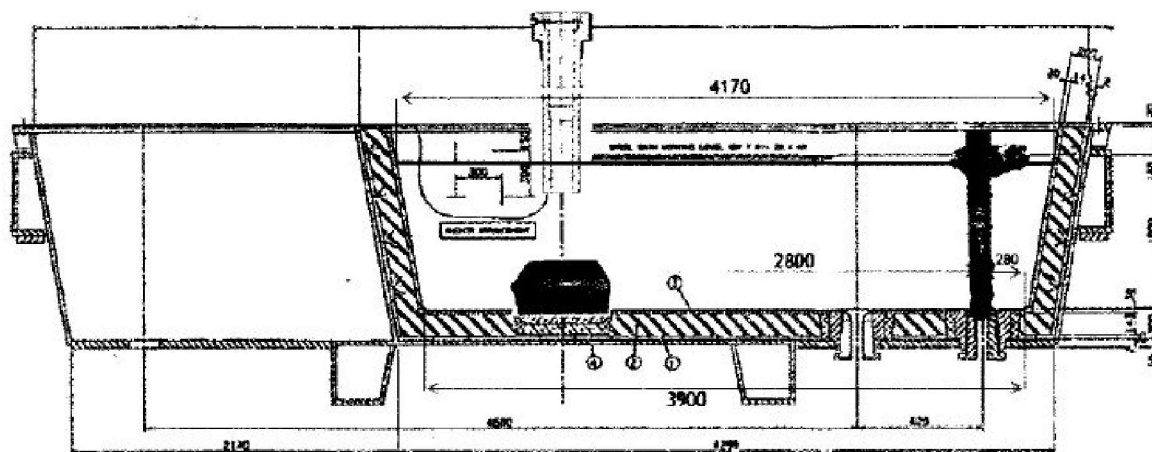
V místech maximálního opotřebení tj. v sedle, ve vnitřním průměru a v oblasti struskové čáry se používá nejkvalitnějších materiálů, oproti vlastnímu tělu trubice. Z důvodů oxidace vzdušným kyslíkem, musí být těsné spojení mezi sedlem výlevky a zasouvacím uzávěrem výlevky za použití vláknitých těsnících vložek (kloboučků) v kombinaci s vháněním ochranného plynu argonem. Injektáž ochranného plynu neboli dmýchání argonem má příznivý účinek na čistotu oceli. Inertní plyn zamezuje přístupu vzdušného kyslíku při odlévání oceli z pánve do mezipánve přes ochrannou (stínicí) trubici [6].



**Obr.5:** Ochranná trubice 1) tělo trubice 2) strusková čára 3) vnitřní průměr 4) sedlo  
5) výstupní otvor [6]

### 1.3 Mezipánev

Zařízení sloužící nejen k zásobování tekutého kovu jednotlivých proudů bez přerušení lití přes ponorné výlevky do krystalizátoru (**obr.6**). Mezi hlavní úlohy mezipánve patří: zmírnění dopadu lité oceli do krystalizátoru, zmírnění rozstříku taveniny, zamezení strhávání licích prášků a strusky do licího proudu, koagulace a koalescence vměstků, udržování stabilního ferostatického tlaku, udržování teploty oceli, udržování výšky hladiny oceli v krystalizátoru, napomáhání vyplouvání nekovových vměstků, krytí oceli rafinační struskou, injektování inertního plynu, řízení napouštění a optimalizace proudění taveniny v krystalizátoru a aktivní ovlivňování fyzikálně-chemických vlastností oceli [7].



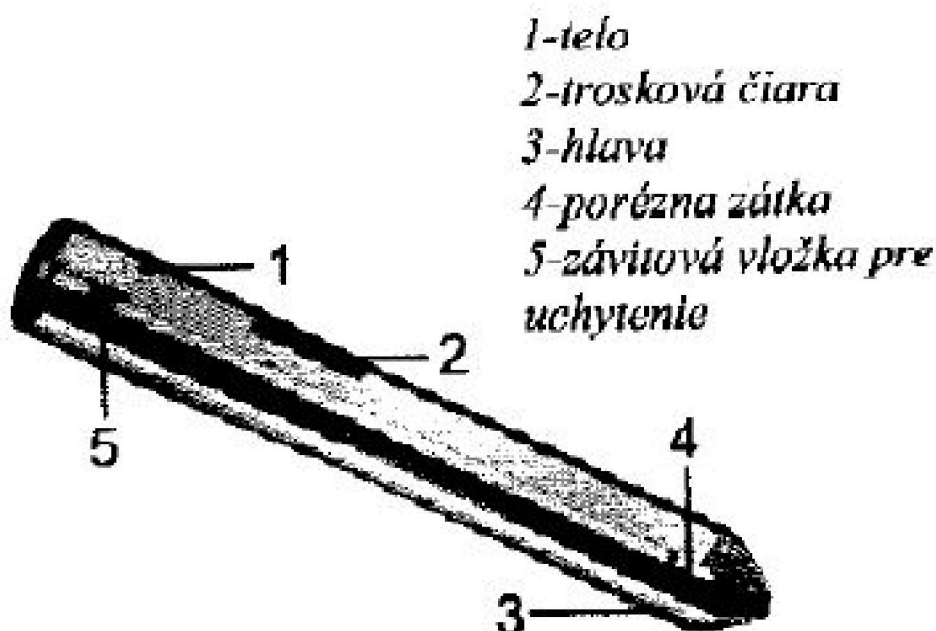
**Obr. 6:** Schéma mezipánve bramového ZPO [15]

Mezipánev patří k posledním místům technologického toku, kde můžeme ovlivňovat mikročistotu taveniny, dosahovat maximálních retenčních časů, minimalizovat mrtvé objemy oceli, zkratové proudění a zajišťovat proudění oceli k mezifázovému rozhraní struska kov z důvodu zajištění kompaktní hladiny oceli [7].

### 1.4 Zátková tyč mezipánve

Úkolem zátkové tyče mezipánve je řízení průtoků tekuté oceli z mezipánve do krystalizátoru. Také zamezuje vniknutí strusky do krystalizátoru při poklesu hladiny v mezipánvi a tím zvyšuje kvalitu plynule odlévaných polotovarů (**obr.7**). Je jedním z nástrojů vhánění ochranné atmosféry argonem do licího kanálu z důvodu zamezení tvorby

hlinitanových nárůstů na jeho stěnách [6].



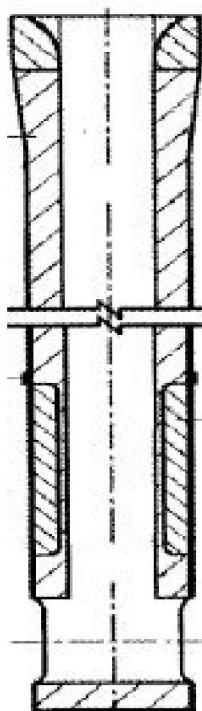
Obr. 7: Schéma zátkové tyče mezipánve [6]

### 1.5 Ponorné trubice a výlevky

Mezi hlavní úlohy ponorných trubic a výlevek (**obr. 8**), patří přesun oceli z mezipánve do krystalizátoru usměrněným licím proudem a účinná ochrana oceli před reoxidací.

Dnes se převážně používají ponorné trubice se zasouvacím uzávěrem a také v kombinaci s měničem trubic se zátkovou tyčí. Požadovaný průtok taveniny zajišťuje hlava zátkové tyče a sedlo výlevky. Požadavkem je kvalitní odlévání oceli po dobu sekvence. Vnitřní část je opatřena ochrannou vrstvou, která zabraňuje zarůstání výlevky, a porézní vrstvou, která umožňuje distribuci argonu přes vnitřní povrch trubice do proudu oceli. Proudění v krystalizátoru mechanicky namáhá trubici v oblasti struskové čáry a chemicky reaguje s ocelí a licími prášky v krystalizátoru.

Výhodné podmínky tuhnutí oceli, jsou podmíněny hydrodynamikou licího proudu a tvarem ústí výtokových otvorů. Dle typu kontilitů hranového nebo blokového, mohou být trubice opatřeny 1-5 výstupními otvory s různým směřováním otvorů, s různým vnějším průměrem a s různou výškou ponoru podle určující kvality odlévaného kontislitku [6].



**Obr. 8:** Schéma výlevky [8]

## 1.6 Krystalizátor

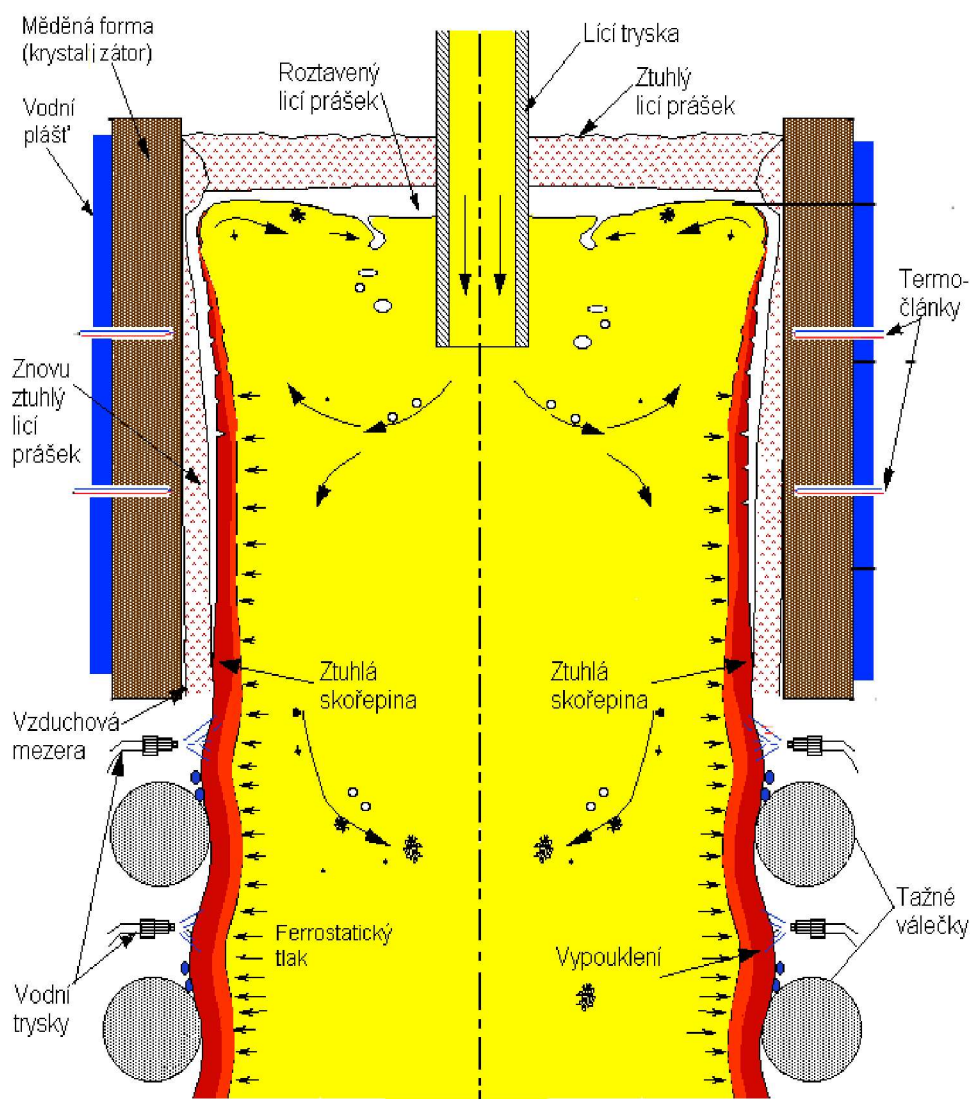
Nejdůležitější součástí zařízení pro plynulé odlévání oceli je krystalizátor (**obr.9**). Tuhnoucí ocel vytváří pevnou vnější kůru z důvodu vysokého odvodu tepla z krystalizátoru odolnou proti působení ferostatického a atmosférického tlaku pod krystalizátorem [4].

Charakteristika krystalizátoru je dána geometrií-tvarem, průřezem, konicitou. Dělíme dle konstrukčního uspořádání na deskové, blokové a trubkové. Podle průřezu na čtvercové, obdelníkové, kruhové, mnohoúhelníkové a profilové. Dále dělíme dle tloušťky stěny krystalizátoru na tenkostěnné a tlustostěnné. Stěny jsou vyrobeny ze slitin mědi Cu-Ag, Cu-Cr, Cu-Zr apod. [1].

Aby se zabránilo přilepení tuhnoucí lící kůry ke stěnám krystalizátoru, je nutný neustálý pohyb mezi stěnami krystalizátoru a stěnou lící kůry. K tomu slouží oscilační zařízení. Snímání hladiny a zajištění nízké kolísavosti je prioritou plynulého odlévání. Ke snížení kolísavosti hladiny přispívá záměna dvou otvorové výlevky za (4-5) otvorovou, které vykazují mnohem nižší hodnoty rozkmitu hladiny oceli v krystalizátoru při vyšších průtocích oceli. Složení lících prášků z chemických sloučenin CaO, MgO, SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, tvoří na



hladině tří vrstvý systém, který chrání ocel před oxidací, nadusičením, pohlcuje a rozpouští vměstky.

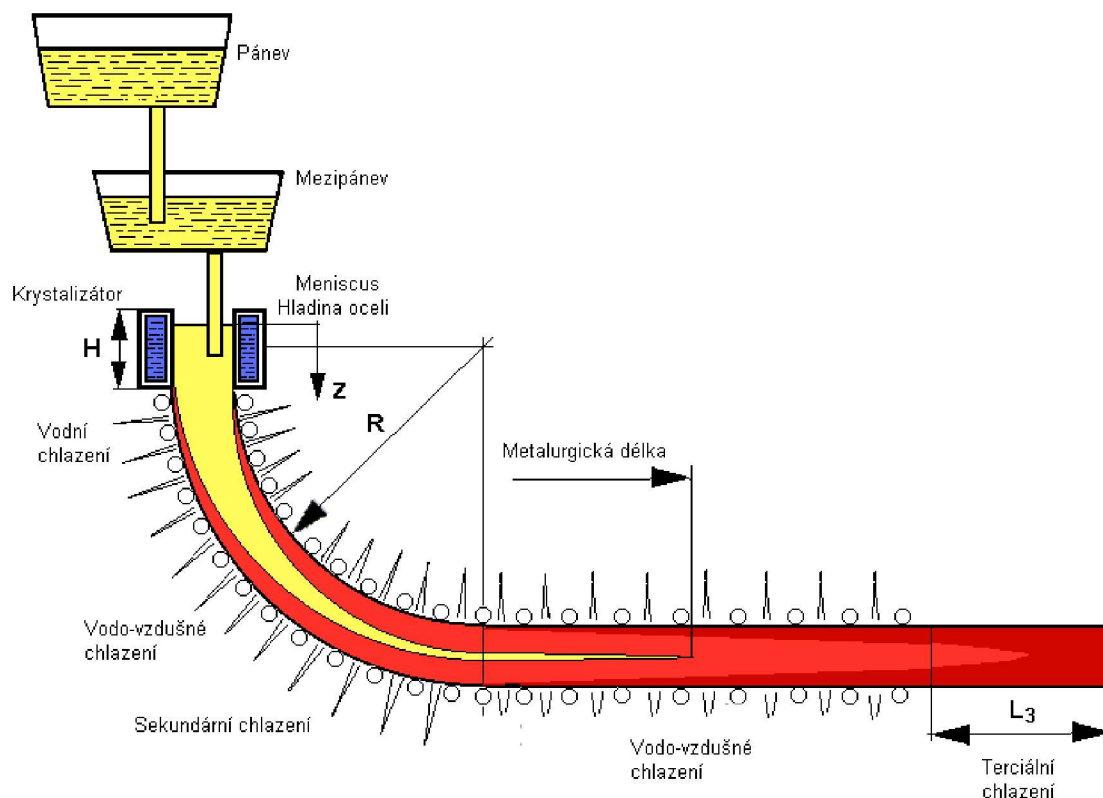


**Obr. 9:** Schéma krytalizátoru [3]

Mezi další úlohy licích prášků patří mazání stěn krytalizátoru, teplotně izolovat hladinu oceli a zajišťovat homogenizaci přestupu tepla v krytalizátoru. Licí prášek plní úlohy malých oxidačních schopností, pohlcuje nekovové vměstky, vykazuje vhodné povrchové napětí, rozpouští se v úzkém teplotním intervalu. Viskozita licích prášků zabraňuje nalepování oceli na stěny krytalizátoru a zamezuje trhání licí kůry [4].

### 1.7 Sekundární chlazení

Sekundární chlazení probíhá na výstupu odlitku z krystalizátoru, kde dochází k pokračování tuhnutí předlitku až do utuhnutí jeho jádra (**obr.10**).



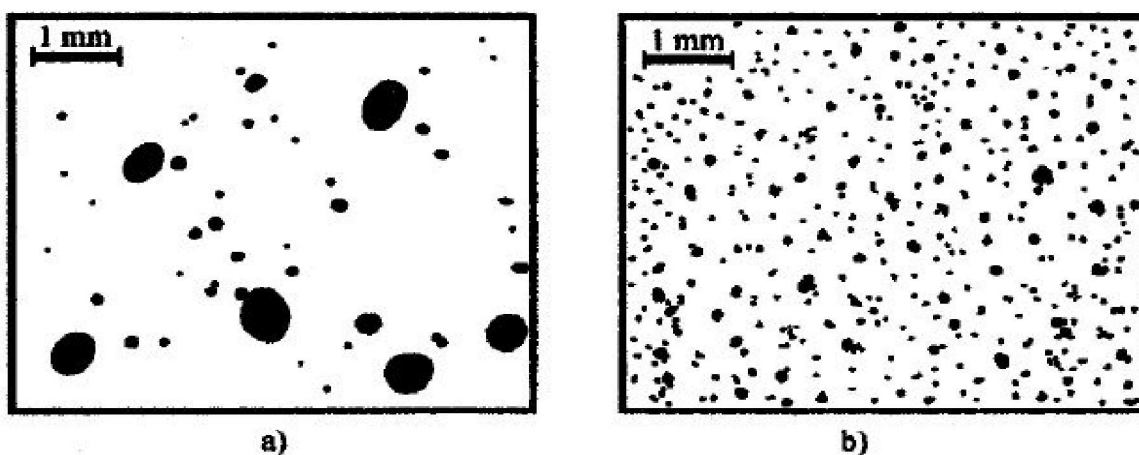
**Obr. 10:** Schéma chlazení ZPO [3]

Zařízení sekundárního dochlazování je tvořeno z nosné konstrukce opěrných a tažných válečků s ložisky, rozvodem chladicí vody s rozprašovacími tryskami, sběrnou nádrží, stěračí a např. vodovzdušnými tryskami.

Způsob realizace sekundárního chlazení velmi ovlivňuje povrchovou a vnitřní kvalitu tvořících se plynule odlévaných předlitků. Technologickým cílem je dosažení rovnoměrné a dostatečně tlusté lící kůry a tím zabránění vzniku průvalu. Aby nedocházelo k velice rozdílným vlastnostem struktury kovu od vlastního kovu, je nutné získat co nejmenší podíly ploch různosých krystalů. Tuhnoucí zbylá část taveniny je obohacena o nežádoucí prvky, doprovázená vznikem staženin. Vznikají středové necelistvosti, trhliny a další vady předlitku [9].

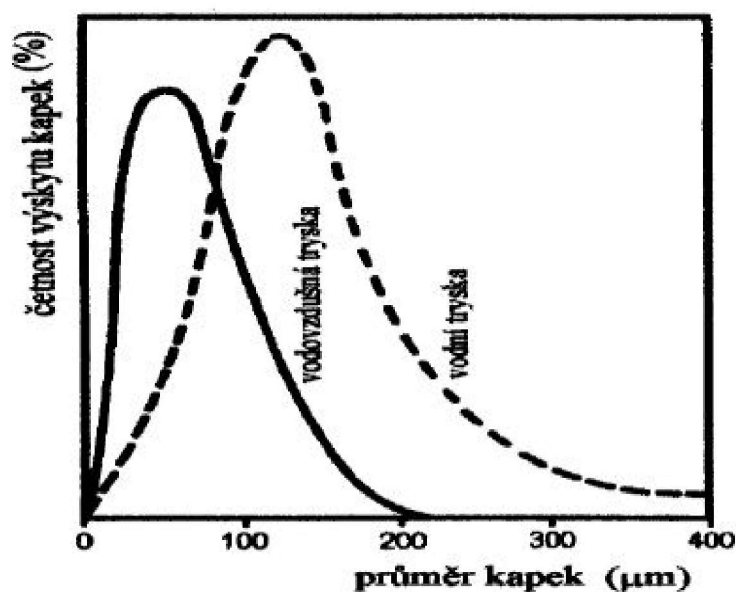
Požadavky na sekundární chlazení : rovnoměrné chlazení předlitku, zvýšená intenzita chlazení v důsledku vysokého podílu odpařené chladicí vody, krátká doba kontaktu neodpařené vody s předlitkem, široký rozsah regulovatelnosti intenzity ostříku dle vyráběných druhů oceli, stabilita charakteristik ostříku a minimální údržba chladicího systému.

V sekundární oblasti chlazení používáme dva typy chladicích systémů, a to jednosložkové (vodní) a dvousložkové (vodovzdušné). **(Obr.11)** znázorňuje srovnání kapkového spektra trysky vodní a vodovzdušné [10].



**Obr. 11:** Kapkové spektrum trysky a) vodní; b) vodovzdušné [10]

Četnost výskytu kapek na průměr kapek v mikrometrech zobrazuje **(obr.12)**.



**Obr. 12:** Četnost výskytu kapek [10]

Intenzitu ostříku a rovnoměrnost vypočítáme z objemu vody  $V$ , dopadajícím na jednotkových povrch za jednotku času dle vzorce **(1)**.

$$I = V/S \cdot \tau \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1)$$

kde  $I$  - Intenzita ostříku ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  
 $V$  - objem ( $\text{m}^3$ ),  
 $S$  - ostříková plocha ( $\text{m}^2$ ),  
 $\tau$  - doba ostříku (s).



## **2 Analýza současné literatura z oblasti provozních a laboratorních metod studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli**

V této kapitole je proveden rozbor literárních zdrojů zaměřených na metody studia metalurgických procesů v jednotlivých částech zařízení, probíhajících při lití a tuhnutí oceli.

### ***2.1 Příklad způsobu studia metalurgických procesů probíhajících v lící pánvi***

Veliký význam v ocelářství zejména z hlediska rafinace tekuté oceli zaujímá pánvová metalurgie. Základními pochody pánvové metalurgie zahrnují legování lázně, její ohřev, modifikací vměstků, dmýchání inertního plynu aj. [11].

#### **2.1.1 Fyzikální modelování přenosových pochodů v pánvi při použití různých variant dmýchání inertního plynu**

Úkolem autorů [11] bylo fyzikální modelování homogenizačních procesů probíhajících v lících pánvích za využití dmýchání inertního plynu přes půdní dmyšné elementy a pomocí horem dmýchané svisle ponořené trysky.

Byl sestaven fyzikální model lící pánve, ve kterém na základě údajů změny vodivosti a teploty lázně byl sledován průběh homogenizačních procesů, ze kterých byly následně odečítány homogenizační časy.

Studováno bylo pouze umístění dmýchání ve středu (resp. v ose) lící pánve. Bylo provedeno šedesát korektních experimentů. Ve srovnání s horní tryskou byl prokázán výrazně lepší průběh homogenizace při použití půdního dmyšného elementu. Rovněž byl prokázán znatelný vliv hloubky ponoru dmýchací trysky. Při malém ponoru a úzkém průtoku dochází k rychlým prodloužením homogenizačních časů způsobených nedostatečnou dynamikou bublin a existencí mrtvých objemů u dna lící pánve [11].

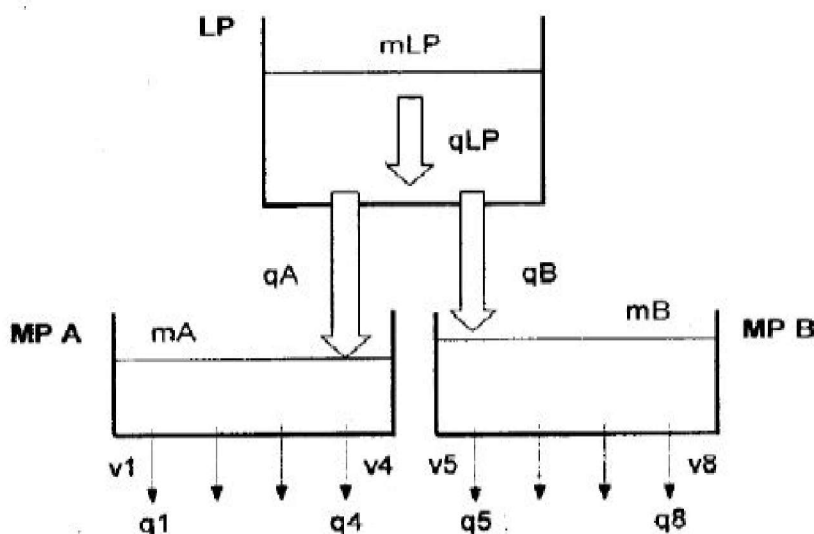
### ***2.2 Metody studia metalurgických procesů probíhajících v oblastech mezipánví***

Mezipáněv představuje poslední agregát, kde lze ovlivnit jakost odlévaných ocelí pomocí technologických postupů, které se souhrnně označují jako mezipánvová metalurgie [13].

### 2.2.1 Matematický model hmotnostních toků oceli na ZPO 2 v Třineckých železárnách, a.s.

Za účelem hlubší analýzy charakteru hmotnostních toků v podmínkách ZPO 2 v Třineckých železárnách sestavili autoři [12] matematický model pro tok oceli na ZPO 2 a ověřili jeho platnost v reálných podmínkách.

Tok oceli z lící pánve (dále jen LP) do mezipánve A, B (dále jen MPA, MPB) s jednotlivými lícími proudy znázorňuje (obr.13).



Obr. 13: Schéma hmotnostních toků oceli na ZPO 2 [12]

Vytvořením spojitého a diskrétního matematického modelu hmotnostních toků oceli na ZPO 2 v soustavě agregátů: pánve - mezipánve – lící proudy, přinesly tyto výsledky: použitelnost modelu pro numerické/fyzikální modelování a pro výpočet rozsahu směsných oblastí. Model lze použít i pro ZPO 1, dále zajišťuje souměrnější práci obou mezipánví i v případě výpadku váhy z MPA nebo MPB s možností přibližného stanovení hmotnosti oceli v MP s dočasně nefunkční váhou. Model směsných oblastí je vhodný pro výuku a použití pro výzkum na příslušných pracovištích technických univerzit a hutních podniků [12].

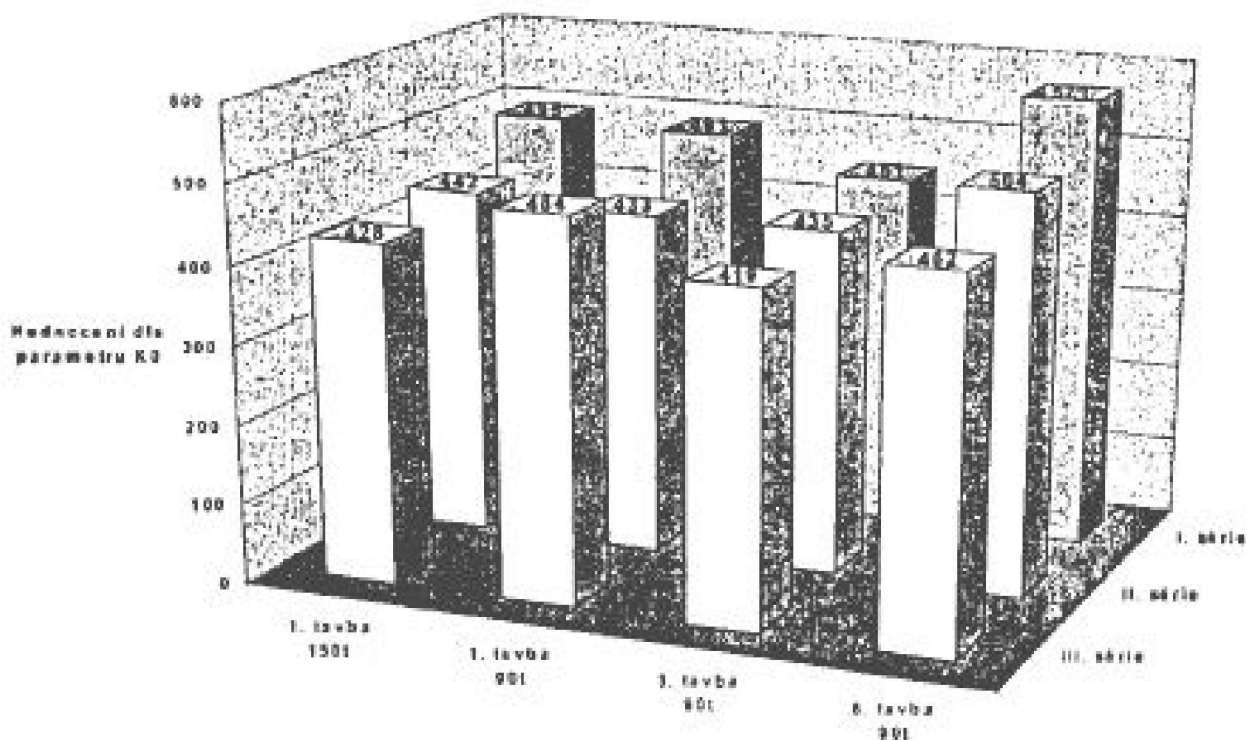
### 2.2.2 Vliv krycích strusek v mezipánvi ZPO na čistotu bram

Úkolem autorů [13] bylo sledování vlivu dvou typů krycích strusek v mezipánvi s použitím turbostopu na čistotu plynule lité bramy. Sledovány byly tři sekvence taveb po šesti tavebách v dané sekvenci s ohledem na chemické složení nekovových vměstků a metalurgickou čistotu bram. Optimalizací krycích strusek je ovlivňována jakost a čistota

odlévané oceli. Ty tepelně izolují lázeň a adsorbují nekovové vměstky během desoxidace a eroze vyzdívky.

Skladba testovaných vzorků z první sekvence (série) je charakteristická pro současnou technologii. Druhé sekvence (série) je charakteristická pro původní technologii před zavedením turbostopu. U třetí (série) sekvence byly zjištěny nejlepší podmínky pro použití rafinačních a krycích strusek a jejich přidávání v průběhu lití sekvence za použití turbostopu v dopadovém místě mezipánve.

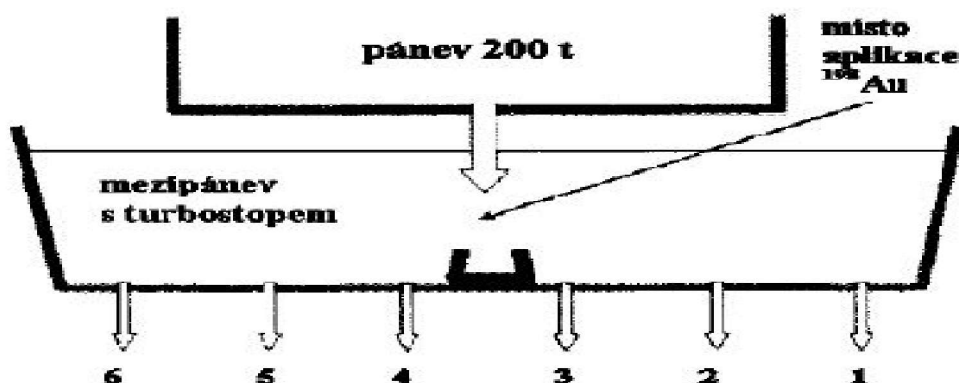
Výsledky mikročistoty umožnily posoudit význam krycích a rafinačních strusek mezipánve ZPO. Nejlepší výsledky byly dosaženy u třetí série taveb z důvodu použití nových krycích a rafinačních strusek a zařazením turbostopu. U první série taveb byly použity používané krycí a rafinační strusky s turbostopem s výsledkem horším než u třetí série. Druhá série taveb se pohybovala v hodnocení mezi první a třetí sérií, byla použita běžná kombinace krycí a rafinační strusky a bez turbostopu. Osvědčilo se používání turbostopu a nová kombinace krycí a rafinační strusky při zvyšování přídatku v průběhu odlévání sekvence (**obr.14**). V chemickém složení nekovových vměstků nebyly nalezeny výrazné rozdíly [13].



**Obr. 14:** Hodnoty mikročistoty ve vzorcích oceli [13]

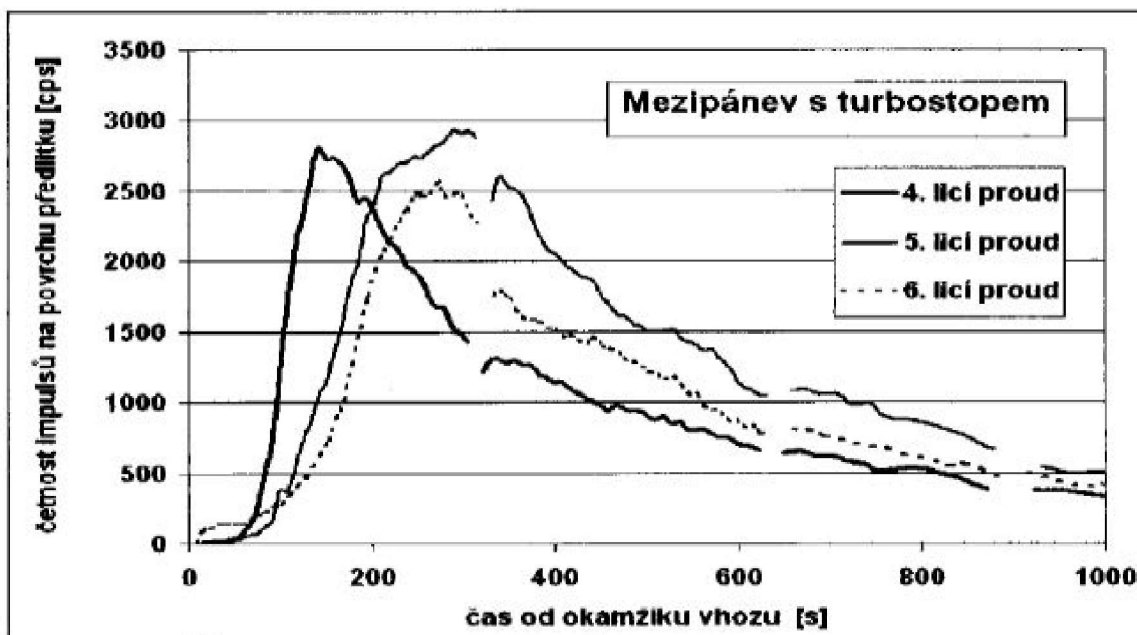
### 2.2.3 Experimentální porovnání vlivu konstrukce mezipánve na proudění oceli

Autoři článku [14] porovnávají vliv konstrukce mezipánve na proudění oceli v šestiproudém zařízení pro plynulé lití ZPO. Ve dvou případech za použití turbostopu a za použití dopadové desky a hrázky mezipánve. Byla použita stopovací metoda aplikace radioaktivního zlata (**obr.15**) aplikovaného na vstupu do mezipánve pod výtokovou trubicí z pánve.



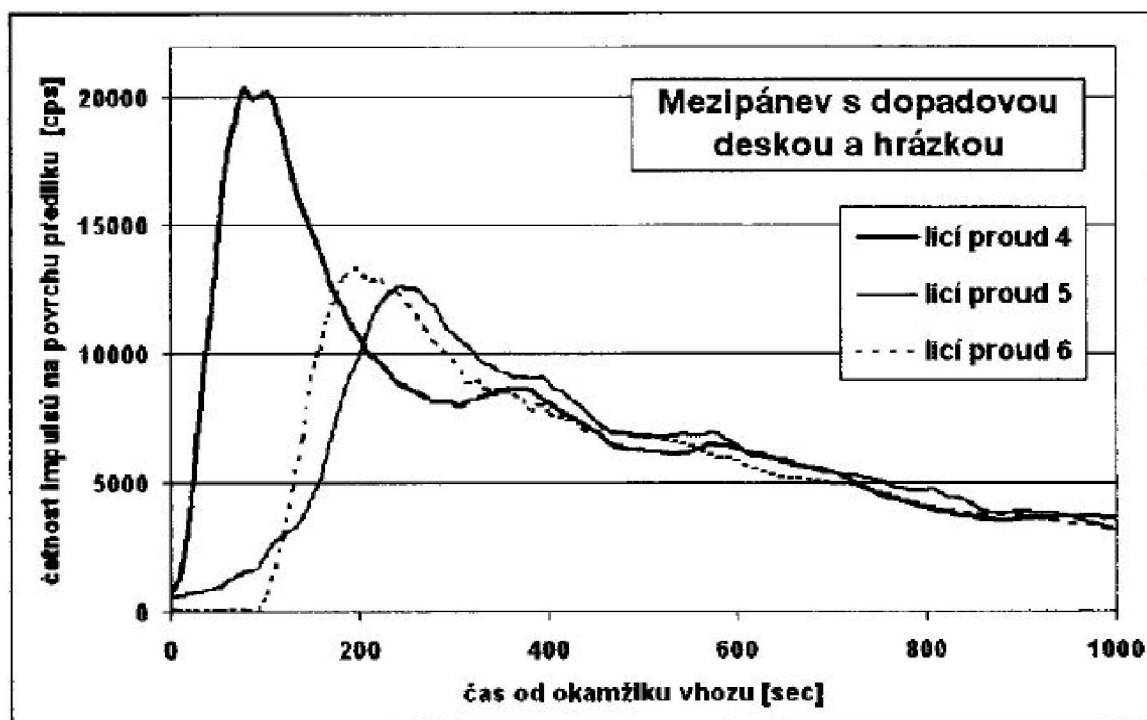
**Obr. 15:** Schematické znázornění uspořádání pánve, mezipánve, licích proudů a místo vhozu zářiče při provedených experimentech [14]

Po vychladnutí předlitku se stanovili RTD (Residence Time Distribution) křivky (**obr.16**) a (**obr.17**).



**Obr. 16:** RTD křivka pro mezipánev s turbostopem [14]

Začátek vhozu zářiče odpovídá počátku měření a hladině krystalizátoru. RTD křivky měří četnost impulsů. Pro přehlednost byly studovány pouze licí proudy č. 4, 5 a 6. RTD křivky pro mezipánev s turbostopem a pro mezipánev s dopadovou deskou a hrázkami se výrazně liší.



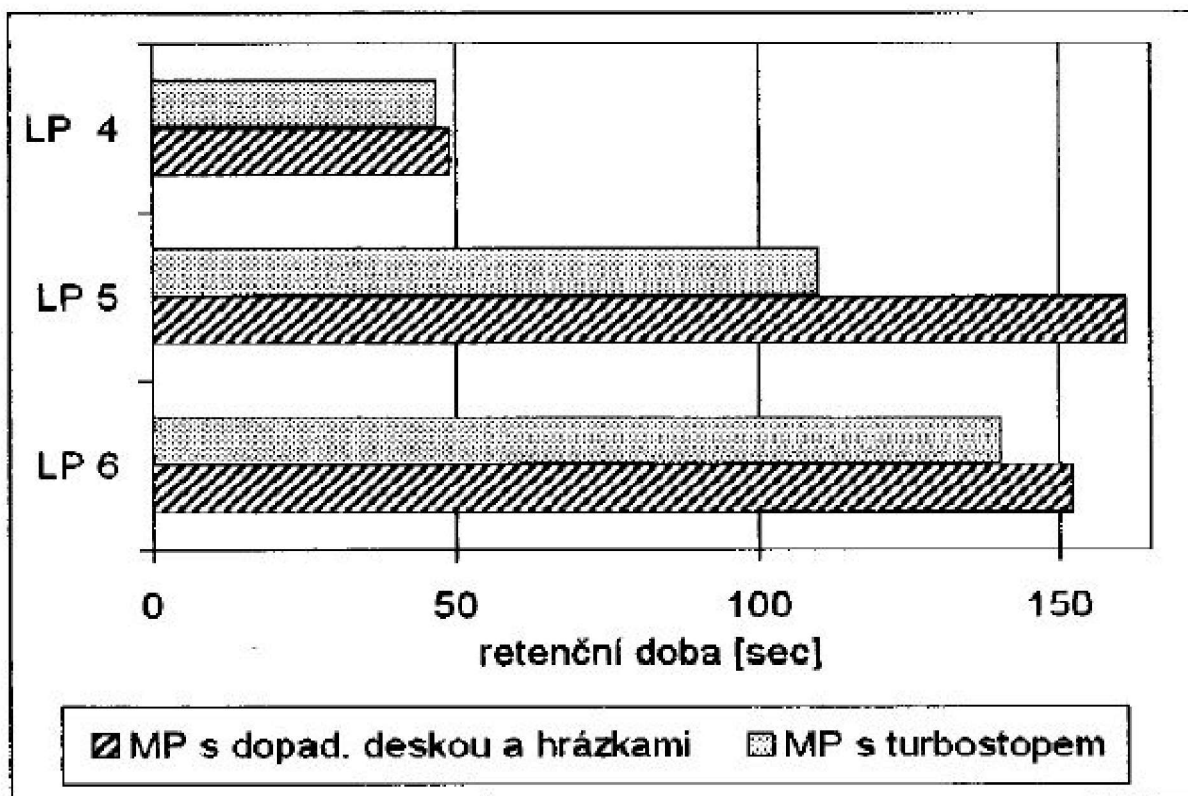
**Obr. 17:** RTD křivky pro mezipánev s dopadovou deskou a hrázkami [14]

U mezipánve s turbostopem jsou RTD pro licí proudy číslo čtyři, pět a šest, podobné, mírně posunuté s postupným nárůstem retenční doby. U mezipánve s dopadovou deskou a hrázkami licího proudu číslo čtyři došlo po vhozu zářiče, k prudkému nárůstu koncentrace zářiče a následovně rychlé dekontaminaci. Ke zpětné kontaminaci licího proudu č. 4 postupně docházelo až při kontaminaci licích proudů číslo pět a šest. To lze vysvětlit zpětným prouděním licích proudů číslo pět a šest ke středu mezipánve.

U mezipánve s turbostopem je rovněž prokázáno zpětné proudění, ale v daleko menší míře. Zde je prokázán rozdíl v charakteru proudění mezi oběma mezipánvemi v závislosti na typu dopadového místa. Podobně se chovají i retenční časy mezipánví (**obr.18**).

U mezipánve s turbostopem postupně narůstají retenční časy. Mezipánev s dopadovou deskou a hrázkami vykazuje u licího proudu číslo čtyři velký rozdíl od licích proudů číslo pět a šest. Retenční čas na licím proudu č. pět je větší než u proudu číslo šest. Analýza křivek

RTD udává značný rozdíl charakteru proudění mezipánve s turbostopem a mezipánve s dopadovou deskou a hrázkami [14].



Obr. 18: Průměrná retenční doba pro licí proudy č. 4, 5 a 6 pro obě mezipánve [14]

#### 2.2.4 Návrh úprav v oblasti mezipánve brambového ZPO na základě numerického a fyzikálního modelování

V příspěvku jsou autory [15] řešeny úpravy velikosti mezipánve brambového ZPO s ohledem na výrobní parametry pomocí metod numerického a fyzikálního modelování. Byly provedeny úpravy tvaru dna, úpravy tvaru dopadového místa oceli v mezipánvi, úpravy délky (zvětšení), zavedení profilovaného dna a nového optimalizovaného turbostopu.

Důvodem úprav mezipánve bylo zvýšení maximální rychlosti lití na brambovém ZPO (až 2,75 m/min), což vedlo k rychlejšímu vyprazdňování licí pánve. Hrozilo riziko poklesu hladiny pod bezpečnou úroveň oceli v mezipánvi a tím negativní snižování výkonu ZPO.

Úpravou profilu dna mezipánve se minimalizuje slitek oceli po odlití. Byly navrženy možné změny profilu dna. Fyzikální modelování bylo doplněno numerickým modelováním s cílem hlubšího studia možností zajištění usměrněného vyplouvání vměstků na hladinu oceli. Pomocí fyzikálního modelování a metod numerických simulací byl zvětšován pracovní objem

mezipánve. Výsledky modelování byly porovnány s provozními podmínkami. Byly testovány zvětšení délky mezipánve o 1 – 2,14 metrů a numerickým modelováním simulovány různé výšky hladiny oceli. Zvětšování délky mezipánve má vliv na vznik mrtvých zón a tendenci zamrzání taveniny oceli v oblasti za turbostopem. Zamrzání se předpokládalo pro výsledné teploty z numerických simulací, které byly nižší o 6, 9, 12 a 15 °C než teplota oceli na vstupu do mezipánve.

Bylo zjištěno riziko zamrzání při zvětšení mezipánve nad jeden metr a možný výskyt utuhlé strusky v oblasti zátkové tyče. Proto bylo doporučeno zvětšení délky mezipánve pouze o jeden metr.

Výsledkem modelování je stanovení nové architektury mezipánve. Upravil se objem mezipánve, dno mezipánve, zavedl se nový typ turbostopu k zajištění dostatečného objemu oceli při vysokých licích rychlostech s dosažením vyšší mikročistoty oceli [15].

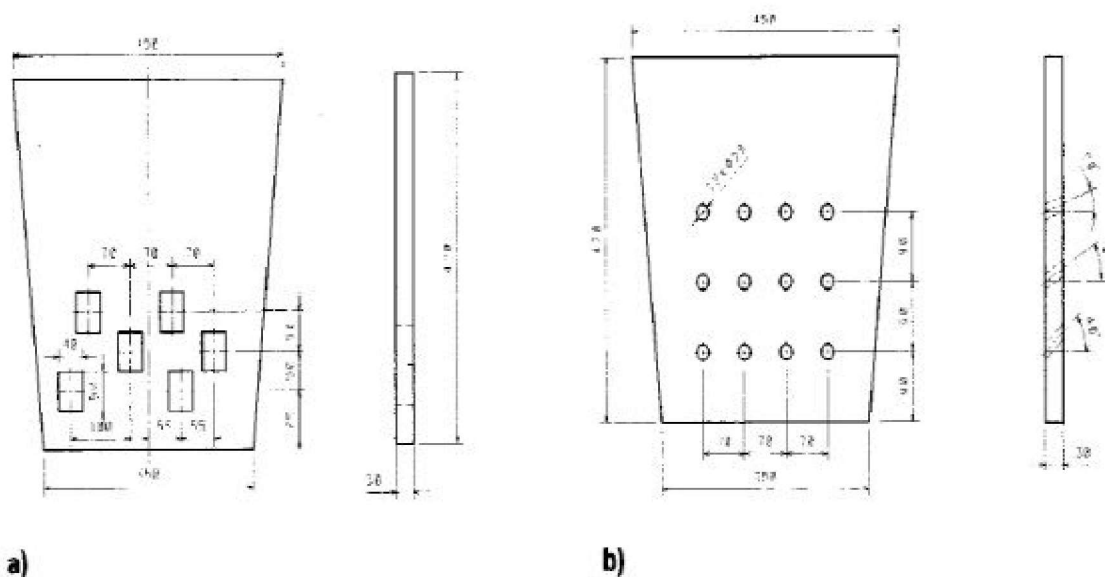
#### **2.2.5 Fyzikální modelování různých modifikací dopadového místa mezipánve**

Fyzikální modelování autoři [16] provedli na modelu mezipánve sestrojeného z plexiskla v geometrickém měřítku 1:4. Studovalo se ovlivnění charakteru proudění oceli na místo dopadu turbostopu čtvercového typu s umístěním děrovaných přepážek typu (Baffle 1), pro zadané provozní podmínky při odlévání kvadrátu 300x350 mm a doplňování mezipánve z 23, 29 a 35 tun na 38 tun oceli.

Dynamika proudění oceli byla porovnávána pomocí charakteristických retenčních časů. Experimenty měření a výpočty prokázaly, že volba konfigurace dna specifika (Baffle 1) je mnohem výhodnější než daná simulovaná varianta turbostopu. Přepážky typu baffle zrovnoměňují rychlost distribuce oceli mezi jednotlivé licí proudy, minimalizuje turbulentní proudění za děrovanými přepážkami. Pistový charakter proudění napomáhá vyplouvání nekovových vměstků a zamezuje vzniku zkratového proudění [16].

#### **2.2.6 Možnosti úpravy proudění oceli v symetrické mezipánvi**

Na Hutnické katedře v Košicích autoři [17] studovali problematiku proudění oceli v symetrické mezipánvi na fyzikálním modelu zkonstruovaném v geometrickém měřítku 1:3. Porovnávali retenční časy mezipánve s turbostopem (**obr.19**) a novými navrženými přepážkami s kruhovými otvory, jejíž osy směřovaly vzhůru pod úhlem 20°, 30° a 40°.



**Obr. 19:** Schéma přepážek a) původní; b) navrhnutá [17]

Navrhovaná přepážka usměrňuje proud oceli směrem k hladině strusky za současného prodloužení retenčního času, snížení mrtvého objemu a zvýšení čistoty oceli.

Retenční čas mezipánve s rychlostí lití lineárně klesá. Minimální retenční čas se při použití navržených přepážek se prodloužil o 26,3% oproti původním přepážkám. Oblast mrtvých zón se dá eliminovat volbou vhodné dopadové desky, přepážkou a hrázkou. Návrhem nových přepážek s otvory s úhlem směřujícím k hladině strusky se podařilo výrazně ovlivnit (zmenšit) oblast mrtvých zón a prodloužit retenční čas [17].

### 2.3 Metody studia metalurgických procesů v oblasti krystalizátorů

Krystalizátor je základní částí lícího stroje, která má významný vliv na činnost zařízení pro plynulé odlévání oceli [10].

#### 2.3.1 Experimentální měření pracovních podmínek v krystalizátoru sochorového ZPO

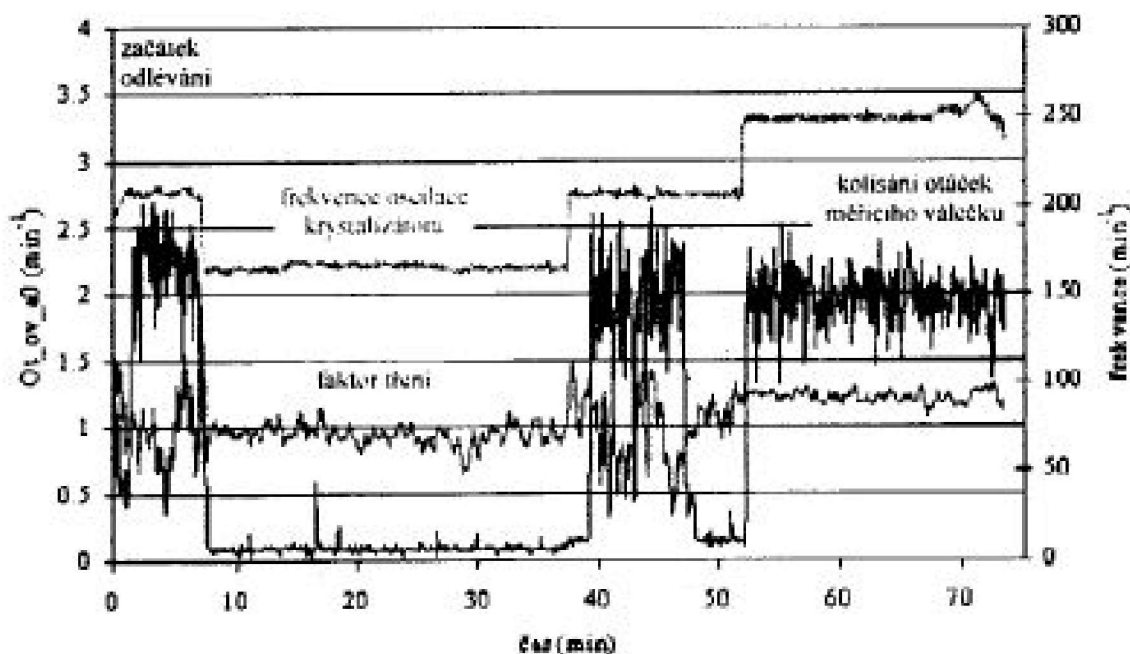
Na sochorovém ZPO v Mittal Steel Ostrava, a.s. byla autory [18] provedena rozsáhlá měření pracovních podmínek v krystalizátorech kvadrátu 115 mm. Navržený nový systém měření byl realizován v jednom lícím proudu. Detailně zmapoval tepelnou práci vložky krystalizátoru a vzájemného tření mezi vložkou krystalizátoru a odlévaným proudem. Aplikace se prováděla na otevřeném lití bez použití lících prášků s mazáním syntetickým



nebo řepkovým olejem.

Řešil se problém podélných rýh v krystalizátorových vložkách pod meniskem, cukání licího proudu z pohledu dynamiky zařízení regulace pohonu, kmitání licího proudu a oscilace krystalizátoru.

Analýza dat cukání licího proudu, odchylek otáček měřicího válečku s ohledem na faktor tření a frekvenci oscilací znázorňuje (obr.20).



**Obr. 20:** Amplituda otáček měřicího válečku, faktor tření a frekvence oscilací [18]

První cukání v 2-7 minutě odlévání ustalo po snížení frekvence. Opět nastalo v 39. minutě z důvodu zvýšení tření a zvýšení frekvence. V 48 minutě se tření a cukání stabilizuje. Po 52 minutě licí proud stále cuká i přes zvýšení frekvence oscilací.

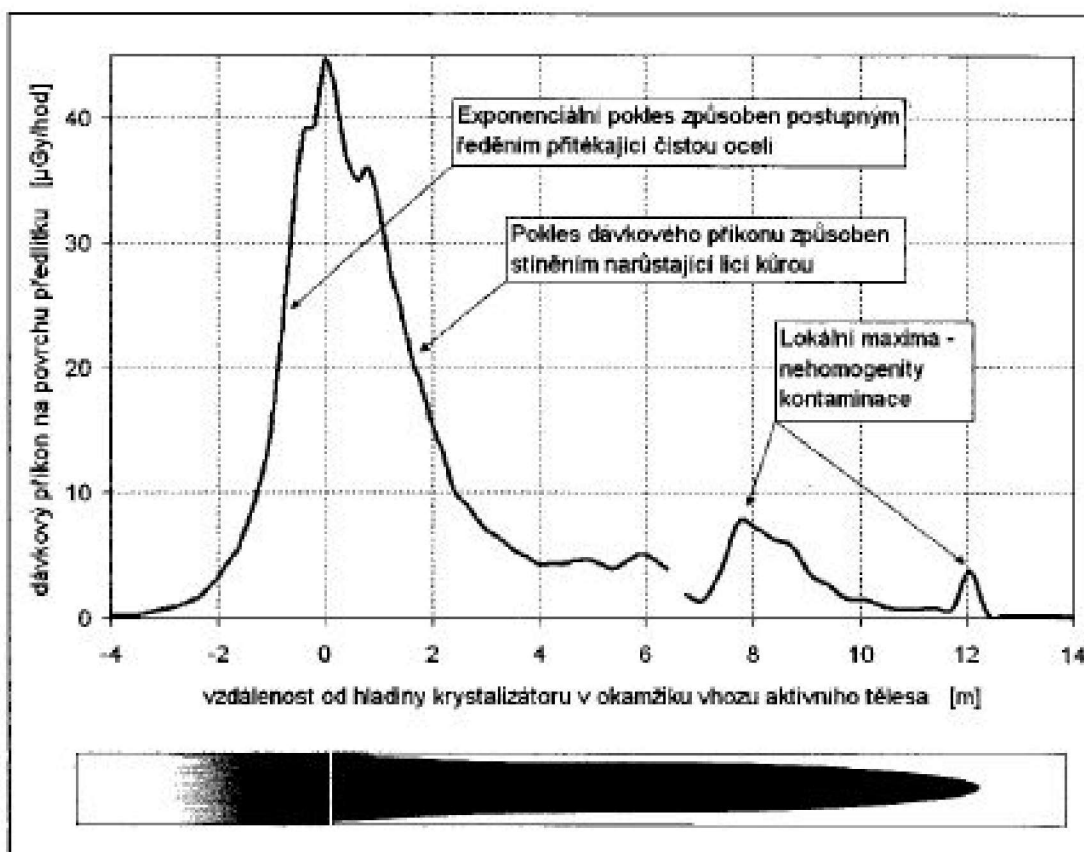
Nový vyzkoušený systém měření pracovních podmínek v oblasti krystalizátoru, zaznamenal a analyzoval velké množství dat teplotních, třecích a oscilačních parametrů krystalizátoru. Analýza cukání licího proudu a opotřebení použité vložky krystalizátorů zajistila, že při daných podmínkách oscilace se minimalizuje nežádoucí cukání. Nové podmínky byly později zavedeny do licích postupů [18].

### 2.3.2 Stanovení vlivu elektromagnetického míchání na velikost promíchávaného objemu v krystalizátoru

Autory [19] byly prováděny experimenty zaměřené na použití elektromagnetického míchání v krystalizátoru. Pro stanovení velikosti intenzivně promíchávaného objemu oceli bylo použito stopové metody kontaminace tekutého jádra vhozením olověného tělesa radiozotopu  $^{124}\text{Sb}$  do tekutého jádra krystalizátoru.

Po vychladnutí předlitků byly odebrány vzorky z definovaných míst, ofrézovány a exponovány autodiagramem. Zčernání zobrazuje dané místo tekutého jádra, ovlivněné ředěním přitékající oceli, stíněním narůstající líci kůry a nehomogenity kontaminace.

Průběh měřeného dávkového příkonu po délce kontaminovaných předlitků je znázorněn na (obr.21).



**Obr. 21:** Dávkový příkon po délce předlitků po kontaminace radioaktivním  $^{124}\text{Sb}$  [19]

Odhady objemu oblasti intenzivního míchání v krystalizátoru byly provedeny na základě čtyř experimentů a řadou výpočtů. Bylo zjištěno, že použití elektromagnetického

míchání v oblasti krystalizátoru zvětšuje promíchávaný objem přibližně o 15% [19].

### 2.3.3 Vybrané zkušenosti z monitoringu oscilace krystalizátoru bramového ZPO

S využitím přenosného měřicího a vyhodnocovacího systému bylo autory [20] prováděno měření u různých rychlostí odlévání a různých jakostí oceli. Byly zjišťovány odchylky parametrů oscilace a tření na jednotlivých stranách krystalizátoru. Byla posuzována tepelná práce krystalizátoru s řešením odvodu tepla a ověřovány vlivy elektromagnetických brzd na stav menisku v krystalizátoru a kvalitu oceli. Pro povrchovou úpravu měděných desek byl použit tvrdý nikl. Dále byla věnována pozornost opotřebením desek krystalizátoru, byl vyvíjen ultrazvukový měřicí systém a optimalizovány vodní chladicí kanálky úzkých desek krystalizátoru.

Byly prováděny numerické simulace proudění a tuhnutí oceli v krystalizátoru, řešena problematika tření s ohledem na cukání licích proudů, řešeny monitorovací a predikční systémy pro vyhodnocování na základě mechanických teplotních veličin krystalizátoru. Dále bylo prováděno měření fluktuací teplot ve stěně krystalizátoru, měření úrovně mazání a velikosti tření krystalizátoru.

Cenné poznatky vyhodnocování a měření v oblasti oscilačního zařízení lze používat u různých jakostí oceli a v různých podmínkách odlévání oceli. Je umožněno optimalizování podmínek odlévání při používání daných typů licích prášků a různých rychlostí lití oceli. Z pohledu efektivního využívání systému jsou nutné odborné znalosti v oblasti teorie a praxe v odlévání oceli [20].

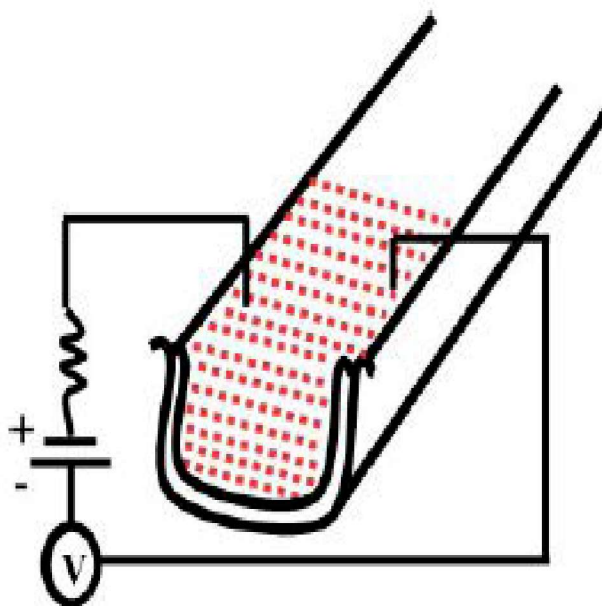
### 2.3.4 Vliv elektrického napětí na chování licího prášku během tuhnutí předlitků

Studium autora [21] bylo zaměřeno na vliv elektrického potenciálu na chování licího prášku během tuhnutí předlitků. Aplikace elektrického potenciálu při tuhnutí kovů a slitin, zlepšuje fyzikální a mechanické vlastnosti odlitků. Probíhající fázová přeměna (růst dendritů) a její charakter má vliv na zjemňování mikrostruktury, snižování poréznosti a na homogenizaci rozpuštěné látky v roztoku. Elektrický potenciál mění kinetiku, termodynamiku a tím i pevnost materiálů z důvodů nukleace zárodků a růstu krystalických fází. Elektrický proud ovlivňuje fyzikálně chemické vlastnosti povrchového napětí struska/kov, ovlivňuje elektrokapilaritu, chemické reakce, smáčivost mezi struskou a kovovou fází.

V kontinuálním lití oceli je jednou z úloh licího prášku tepelná izolace hladiny,

homogenizace přestupu tepla mezi tekutou ocelí a měděnou formou krystalizátoru. Licí prášek zlepšuje povrchové a podpovrchové vlastnosti litých polotovarů. Proto je nezbytně nutné optimalizovat tepelně chemické a tepelně fyzikální vlastnosti licích prášků jako jsou viskozita a krystalizace.

Experimenty byly prováděny za aplikace a bez aplikace stejnosměrného elektrického proudu 25 V do zkoumaného vzorku licího prášku (**obr.22**).

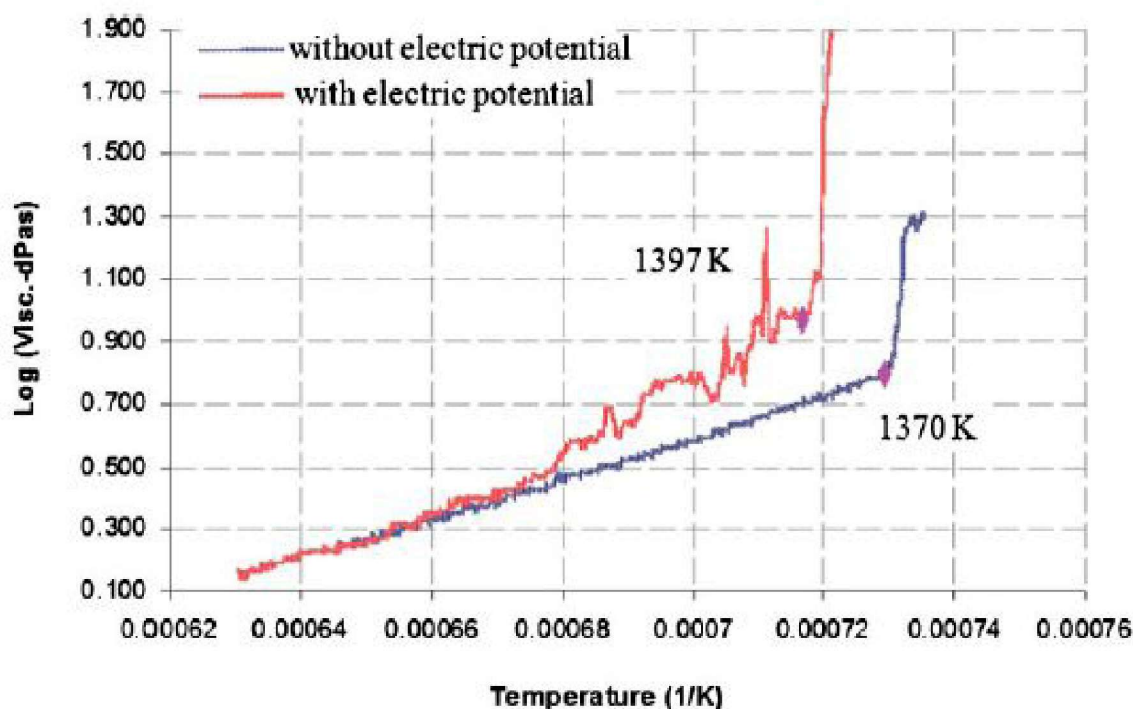


**Obr. 22:** Schéma znázorňující experiment elektrického potenciálu [21]

Teplotními experimentálními postupy bylo zjištěno, že aplikace elektrického potenciálu během tuhnutí licího prášku při teplotní prodlevě, zvyšuje teplotu z 1370 – 1397 K, rozdíl 27 K a tím vytváří podmínky pro krystalizaci.

Roztavený licí prášek lze považovat za ionizovaný materiál. Aplikovaný elektrický proud v roztaveném licím prášku zvyšuje pohyb iontů, kde síla působící na ionty je úměrná gradientu elektrického napětí. Když pohyblivost atomů licích prášků dosáhne nebo překročí kritické hodnoty, krystalizace nastane. Aplikovaný elektrický proud bude bránit roztavenému licímu prášku tuhnout do skelného stavu, protože poskytuje více času pro atomy pohybující se do pozice mřížky a vytvářet krystaly.

Mikroskopickým zkoumáním ztuhlých vzorků byly zjištěny rozdílné krystalické oblasti způsobené nedostatečným účinkem elektrického potenciálu na pohyblivost atomů ve spodní oblasti. Důvodem je hloubka ponoření elektrody ve vzorku. Atomy v dolní oblasti vzorku byly vystaveny menšímu gradientu elektrického napětí. Atomy s nižší mobilitou, než je kritická hodnota pro přesun do krystalické mřížky, nebudou přispívat ke krystalizaci. Kinetická viskozita se zvyšuje při klesání teploty. Viskozita při použití elektrického proudu vykazuje rychlejší tempo růstu než bez elektrického proudu (**obr.23**).



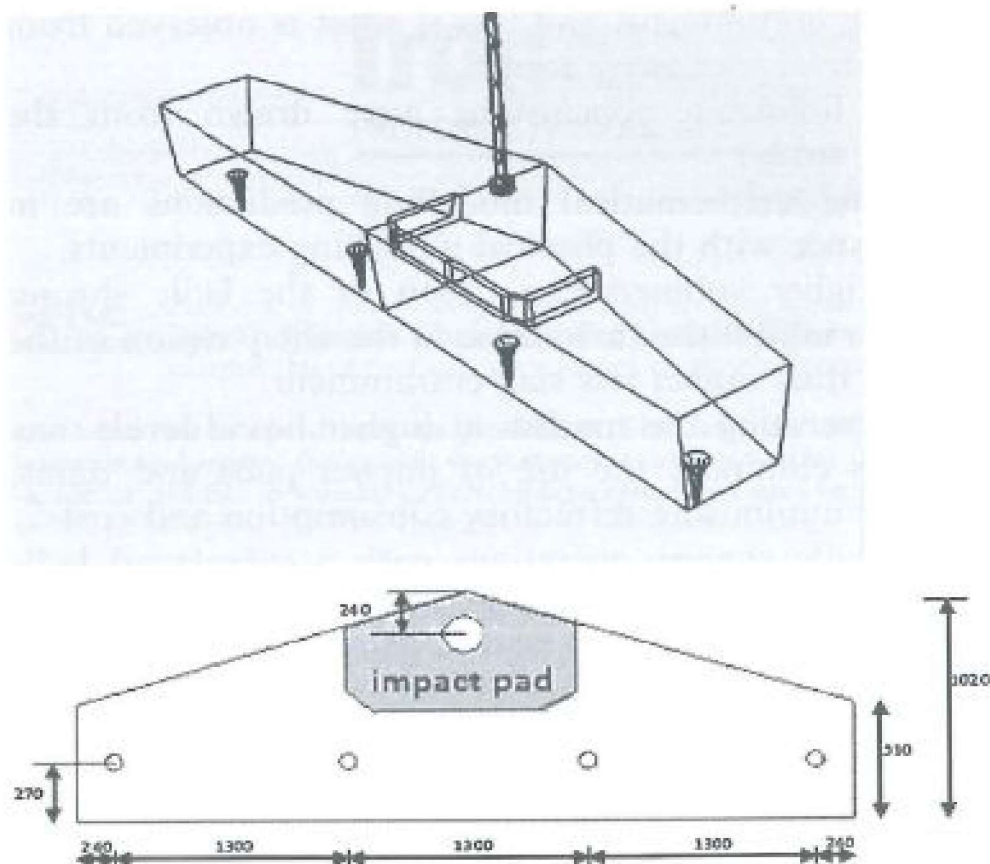
**Obr. 23:** Schéma poměru viskozity a teploty s a bez elektrického proudu [21]

### 2.3.5 Vliv hloubky ponoření stínící trubice na kvalitu tekuté oceli vystupující z krystalizátoru tvaru delta čtyřproudového ZPO

Na základě fyzikálního a matematického modelování bylo autory [22] provedena studie vlivu hloubky ponoření stínící trubice na kvalitu tekuté oceli vystupující z krystalizátoru tvaru delta čtyř proudého zařízení pro plynulé odlévání oceli. Na vodním modelu mezipánve sestrojeného v měřítku 1:1 (**obr. 24**), byl simulován účinek strhávání strusky pro různé hloubky ponoru. Pro simulaci struskové fáze byly použity polyetylenové kuličky ( $920 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Relativní výkon v oblasti strhávání strusky byl udáván počtem kuliček odebraných z každé ponorné výlevky během pánvové výměny. Pomocí trojrozměrného



matematického modelu byla zkoumána turbulentní kinetická energie při různých hloubkách ponoření stínicí trubice. Při nízkých hloubkách ponoru je v mezipánvi vysoká turbulence, která způsobuje větší strhávání strusky. Naopak při větším ponoru mezipánve je turbulence nízká a tím množství strhávání strusky menší. Mezipánvové operace s vyšší hladinou v mezipánvi může vyloučit potřebu instalace tlumičů turbulence a tím snížit spotřebu materiálu a náklady [22].

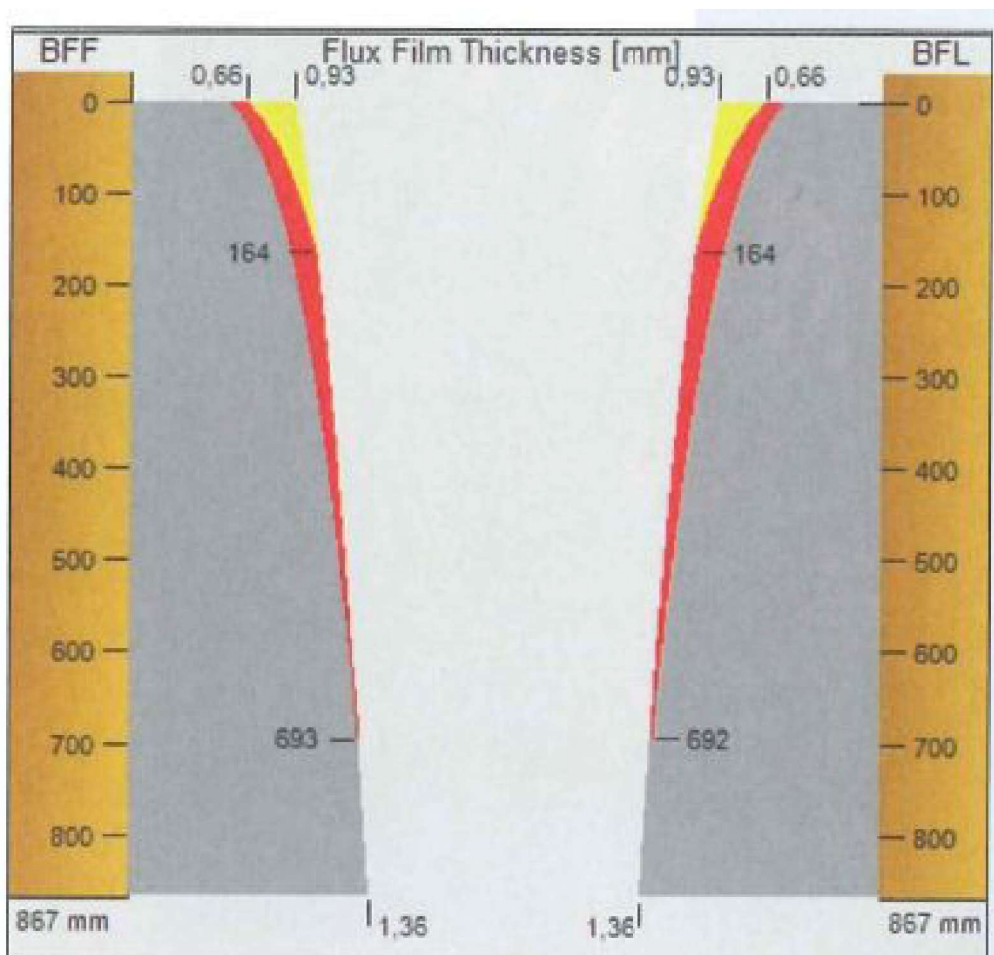


Obr. 24: Schéma modelu mezipánve [22]

### 2.3.6 Predikce kritických provozních podmínek při plynulém lití

Skupina S&B [23] zavedla nový softwarový nástroj „MouldScreen“ umožňující předvídat kritické provozní podmínky monitorováním kontinuálního lití. Systém identifikuje a zobrazuje kritické podmínky při lití, které mohou vést k trhlinám, problémům vedoucím k zhoršené kvalitě odlévání a zároveň umožňuje protipatření, které mají být přijata v rané fázi problému. Software vytváří bezpečné základy pro rozhodování při lití za různých podmínek a

pomáhá s optimalizací nákladů. Předpovídá možné scénáře a analyzuje nejasné jevy v provozních podmínkách. Tento software zobrazuje procesně relevantní proměnné, jako je tloušťka stěny předlitku, teplotní pole povrchu lící kůry, kapalnou a utuhlou část předlitku a sleduje teploty vody v chladicích kanálech (**obr.25**).



**Obr. 25:** Schéma filmové vizualizace toku proudění ve formě [23]

S MouldScreen je nyní možné okamžitě posoudit změnu procesu odlévání u různých lících prášků nebo změnu provozních parametrů. Výsledky mohou být znázorněny v grafické podobě ihned při vstupu procesních parametrů např. rychlost lití, množství chladicí vody, geometrie krystalizátoru, analýza stavu lícího prášku a oceli. MouldScreen poskytuje možnost efektivnějších výpočtů a cílených protiopatření vedoucích k zabránění vzniku trhlin a průvalů. Vzhledem k tomu umožňuje objektivně nastavit podmínky pro odlévání oceli [23].

### 3 ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byly rozebrány možné metody studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli. Z dostupné literatury byly charakterizovány procesy probíhající v komplexním zařízení pro plynulé odlévání oceli se zaměřením na jednotlivé ocelářské agregáty, jejich konstrukci a probíhající metalurgické pochody.

V další části byla zpracována současná literatura z oblasti provozních a laboratorních metod studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli zaměřená na technologické uzly lící pánev-mezipánev-krystalizátor.

Shrnutím literárních poznatků této bakalářské práce je zaměřeno především na doporučení experimentálních metod vhodných pro současné potřeby českého ocelářství.

V oblasti lících pánví lze doporučit používat dmýchání inertního plynu spíše pomocí dmyšného půdního elementu než horní tryskou, a to z důvodu výrazně lepšího průběhu homogenizace. Rovněž byl prokázán vliv hloubky ponoru dmýchací trysky. Při malém ponoru a úzkém průtoku dochází k rychlým prodloužením homogenizačních časů způsobených nedostatečnou dynamikou bublin a existencí mrtvých objemů u dna lící pánve.

Doporučené používání experimentálních metod v oblasti mezipánví:

- numerické a fyzikální modelování pro výpočty rozsahů směsných oblastí,
- turbostopy pro eliminaci turbulencí proudu vstupujícího do mezipánve a pro usměrnění proudění v jejím objemu,
- nové kombinace krycích a rafinačních strusek při zvyšování přídatku v průběhu odlévání sekvencí,
- experimenty porovnávající vlivy konstrukce mezipánve na proudění oceli v kombinaci turbostopů, dopadových desek a hrázek,
- modelování k optimalizaci vnitřního tvaru/uspořádání mezipánve se zavedením nových typů turbostopů k zajištění dostatečných objemů oceli při vysokých lících rychlostech s cílem dosažení vyšší mikročistoty oceli,
- fyzikální modelování různých modifikací dopadových míst mezipánve pro volbu konfigurace dna – výhody využití děrovaných přepážek typu Baffle: nové typy přepážek s kruhovými otvory směřujícími pod úhly 20°, 30° a 40°.

Doporučené používání experimentálních metod v oblasti krystalizátorů:



- 
- experimentální měření pracovních podmínek v krystalizátoru,
  - využití elektromagnetického míchání,
  - využití numerické simulace proudění a tuhnutí oceli v krystalizátoru,
  - využití vyhodnocovacích systémů v oblasti oscilačních zařízení,
  - využívání elektrického proudu v krystalizátoru za účelem zlepšení viskozity licích prášků,
  - studium vlivu hloubky ponoření stínící trubice na kvalitu tekuté oceli
  - využívání nového softwarového nástroje „MouldSreen“ k efektivnějším nastavením podmínek pro plynulé odlévání oceli.

Hlavní pozornost českého ocelářství je stejně jako ostatních oceláren ve světě zaměřena na otázky zvyšování kvality odlévané oceli. To vyžaduje maximální pozornost v oblasti čistoty oceli, výroby v úzkém rozmezí chemického složení. Je také kladen velký důraz na finální část odlévání oceli na ZPO.

K optimalizaci metalurgických procesů je vhodné používat kombinaci provozních experimentů i nástrojů, mezi které patří numerické i fyzikální modelování.

## LITERATURA

- [I] PARMA, V. *Ocelářství III*. 2.vyd. VŠB-TU Ostrava, 1985, 192 s.
- [2] KRET, J. *Teorie železářských pochodů. Studijní opora*. VŠB-TU Ostrava, 2008, 119 s.
- [3] ŠTĚTINA, J. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy*. Brno, 2007. Disertační práce. 107 s. Dostupný z WWW:<<http://ottp.fme.vutbr.cz/users/stetina/disertace/>
- [4] BROŽ, L. et al. *Hutnictví železa*. 1.vyd. Praha : SNTL, 1988, 464 s. DT 669.1(075.8)
- [5] JANČAR, D.; HAŠEK, P. et al. Hodnocení životnosti vyzdívky licích pánví metodou neuronových sítí a vyvození následných opatření. In *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli : Sborník přednášek*. Rožnov p.R., TANGER s.r.o. Ostrava, 2.-3.dubna 2008, s.199. ISBN 978-80-86840-39-0.
- [6] FROHLICOVÁ, M.; TATIČ, M. Speciální keramika vo výrobě ocele. In *XVIII. International scientific conference, Iron and Steelmaking : Sborník přednášek*. Malenovice, VŠB-TU Ostrava, 24.-26.9.2008, s.35-40. ISBN 978-80-248-1831-3.
- [7] PYŠ, J.; VÁLEK, L. et al. Míchání oceli v mezipánvích ZPO ve společnosti Mittal Steel Ostrava, a.s. In *XV. International scientific conference, Iron and Steelmaking : Sborník přednášek*. Malenovice, VŠB-TU Ostrava, 14.-16.9.2005, s.120-123. ISBN 80-248-0947-8.
- [8] FUKA, S. *Vliv podmínek odlévání na kvalitu litých bram*. Ostrava, 2009. Bakalářská práce (Bc.). VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2009.
- [9] MORAVEC, R.; HORKÝ, P. Optimalizace sekundárního chlazení na sochorovém ZPO. In *XV. International scientific conference, Iron and Steelmaking : Sborník přednášek*. Malenovice, VŠB-TU Ostrava, 14.-16.9.2005, s.106-109. ISBN 80-248-0947-8.
- [10] PŘÍHODA, M.; BAŽAN, J.; DOBROVSKÁ, J. et al. *Nové poznatky z výzkumu plynulého odlévání oceli*. 1.vyd. VŠB-TU Ostrava, 2001, 177 s. ISBN 80-248-0037-3
- [II] HUDZIECZEK, Z.; MICHÁLEK, K.; GRYC, K. Fyzikální modelování přenosových pochodů v pánvi při použití různých variant dmýchání inertního plynu. In *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli : Sborník přednášek*. Rožnov p.R., TANGER s.r.o.
- 
- HEJDĚNEC, J. *Metody studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli*. VŠB-TU Ostrava, FMFI, 2012.

- 
- Ostrava, 1.-2.dubna 2009, s.58-62. ISBN 978-80-87294-01-7.
- [12] MORÁVKA, J.; MICHALEK, K. Matematický model hmotnostních toků oceli na ZPO 2 v Třineckých železárnách, a.s. In *XV. International scientific conference, Iron and Steelmaking : Sborník přednášek*. Malenovice, VŠB-TU Ostrava, 14.-16.9.2005, s.182-185. ISBN 80-248-0947-8.
- [13] BAŽAN, J.; STRÁNSKÝ, K.; SOCHA, L. et al. Vliv krycích strusek v mezipánvi ZPO na čistotu bram. In *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli : Sborník přednášek*. Rožnov p.R., TANGER s.r.o. Ostrava, 5-6.dubna 2005, s.131-137. ISBN 80-86840-08-5.
- [14] ROZSYPAL, F.; MAYER, J. et al. Experimentální porovnání vlivu konstrukce mezipánve na proudění oceli. In *XVIII. International scientific conference, Iron and Steelmaking : Sborník přednášek*. Malenovice, VŠB-TU Ostrava, 24.-26.9.2008, s.262-265. ISBN 978-80-248-1831-3.
- [15] VÁLEK, L.; MOKROŠ, L. et al. Návrh úprav v oblasti mezipánve brambového ZPO na základě numerického a fyzikálního modelování. In *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli : Sborník přednášek*. Rožnov p.R., TANGER s.r.o. Ostrava, 1.-2.dubna 2009, s.94-101. ISBN 978-80-87294-01-7.
- [16] GRYC, K.; MICHALEK, K.; HUDZIECZEK, Z. Fyzikální modelování různých modifikací dopadového místa mezipánve. In 26. celostátní konference se zahraniční účastí : *Sborník přednášek*. Rožnov p.R., TANGER s.r.o. Ostrava, 14-15.dubna 2010, s.145-151. ISBN 978-80-87294-14-7.
- [17] DEMETER, P.; BUEKO, L.; BARICOVÁ, D. Možnosti úpravy průdenia ocele v symetrickej medzipanve. In *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli : Sborník přednášek*. Rožnov p.R., TANGER s.r.o. Ostrava, 6.-7.dubna 2011, s.157-161. ISBN 978-80-87294-21-5.
- [18] VÁLEK, L. Experimentální měření pracovních podmínek v krystalizátoru sochorového ZPO. In *XV. International scientific conference, Iron and Steelmaking : Sborník přednášek*. Malenovice, VŠB-TU Ostrava, 14.-16.9.2005, s.30-33. ISBN 80-248-0947-8.
- [19] ROZSYPAL, F.; MAYER, J.; VÁLEK, L. et al. Stanovení vlivu elektromagnetického míchání na velikost promíchávaného objemu v krystalizátoru. In *XVIII. International HEJDĚNEC, J. Metody studia metalurgických procesů probíhajících při lití a tuhnutí oceli*. VŠB-TU Ostrava, FMFI, 2012.
-

- 
- scientific conference, Iron and Steelmaking : Sborník přednášek.* Malenovice, VŠB-TU Ostrava, 24.-26.9.2008, s.266-269. ISBN 978-80-248-1831-3.
- [20] VÁLEK, L.; KALUŽA, J. Vybrané zkušenosti z monitoringu oscilace krystalizátoru Bramového ZPO. In 26. celostátní konference se zahraniční účastí : *Sborník přednášek.* Rožnov p.R., TANGER s.r.o. Ostrava, 14-15.dubna 2010, s.119-125. ISBN 978-80-87294-14-7.
- [21] RIAZ, S. Effect of electric potential on mould powder behaviour during solidification. *IRONMAKING AND STEELMAKING.* 2012, vol. 39, no. 6, p. 409-413. ISSN 0301-9233.
- [22] CHATTOPADHYAY, K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. Effect of submergence depth of the ladle shroud on liquid steel quality output from a delta shaped four strand tundish. *IRONMAKING AND STEELMAKING* 2011, vol. 38, no. 5, p. 389-400. ISSN 0301-9233.
- [23] CONTINUOUS CASTING. Predicting critical operating conditions during continuous casting. *METALLURGICAL PLANT AND TECHNOLOGY (MPT INTERNATIONAL).* 2011, vol. 34, no. 5, p. 46-47. ISSN 0935-7254.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1:</b>	Koncepce hutního podniku.....	2
<b>Obr. 2:</b>	Skutečná dispozice hutního podniku.....	3
<b>Obr. 3:</b>	Zařízení pro plynulé odlévání bram.....	4
<b>Obr. 4:</b>	Schéma licí pánve.....	5
<b>Obr. 5:</b>	Ochranná trubice.....	6
<b>Obr. 6:</b>	Schéma mezipánve bramového ZPO.....	7
<b>Obr. 7:</b>	Schéma zátkové tyče mezipánve... ..	8
<b>Obr. 8:</b>	Schéma výlevky.....	9
<b>Obr. 9:</b>	Schéma krystalizátoru.....	10
<b>Obr. 10:</b>	Schéma chlazení ZPO.....	11
<b>Obr. 11:</b>	Kapkové spektrum trysky.....	12
<b>Obr. 12:</b>	Četnost výskytu kapek.....	13
<b>Obr. 13:</b>	Schéma hmotnostních toků oceli na ZPO 2.....	15
<b>Obr. 14:</b>	Hodnoty mikročistoty ve vzorcích oceli.....	17
<b>Obr. 15:</b>	Schematické znázornění uspořádání pánve, mezipánve, licích proudů a místo vhozu zářiče při provedených experimentech.....	17
<b>Obr. 16:</b>	RTD křivka pro mezipánev s turbostopem.....	18
<b>Obr. 17:</b>	RTD křivky pro mezipánev s dopadovou deskou a hrázkami.....	19
<b>Obr. 18:</b>	Průměrná retenční doba pro licí proudy č. 4, 5 a 6 pro obě mezipánve.....	20
<b>Obr. 19:</b>	Schéma přepážek.....	22
<b>Obr. 20:</b>	Amplituda otáček měřicího válečku, faktor tření a frekvence oscilací.....	23
<b>Obr. 21:</b>	Dávkový příkon po délce předlitků po kontaminace radioaktivním <sup>24</sup> Sb.....	24
<b>Obr. 22:</b>	Schéma znázorňující experiment elektrického potenciálu.....	26
<b>Obr. 23:</b>	Schéma poměru viskozity a teploty s a bez elektrického potenciálu.....	27
<b>Obr. 24:</b>	Schéma modelu mezipánve.....	28
<b>Obr. 25:</b>	Schéma filmové vizualizace toku proudění ve formě.....	29